

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
HHT-Projekt

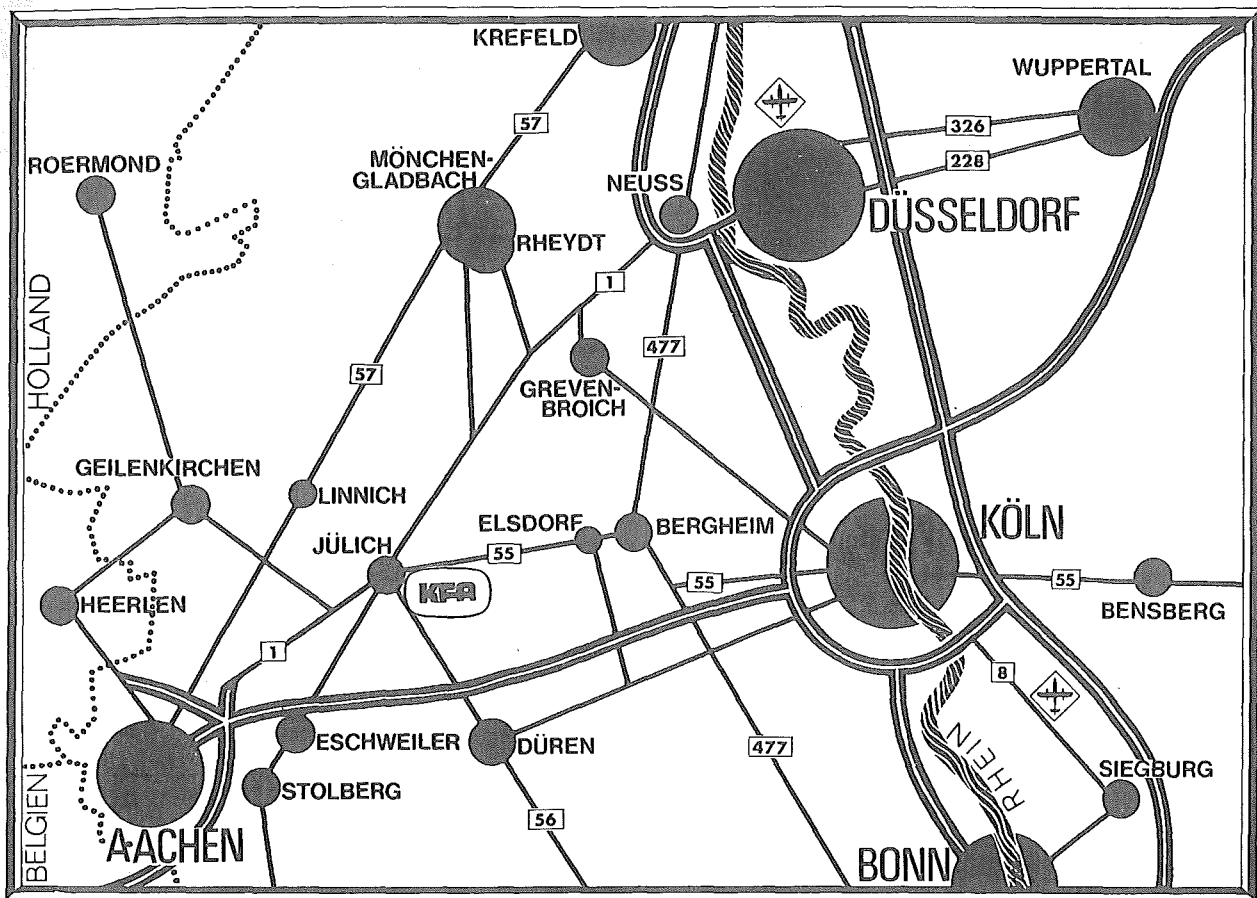
Systemanalyse der Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs

von

J. Kayser

Jül - 1016 - HT
November 1973

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1016
HHT-Projekt Jül - 1016 - HT

Dok.: Fuel Reprocessing Plants - System Analysis
High Temperature Reactor - Fuel Reprocessing
Fuel Cycle - System Analysis

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Systemanalyse der Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs

von

J. Kayser

S Y S T E M A N A L Y S E

DER

"STUDIE ZUR SCHLIESSUNG DES HTR-BRENNSTOFFKREISLAUFS"

von

Jürgen Kayser*

KURZFASSUNG

Ausgehend von den Marktprognosen für Hochtemperatur-Reaktoren (HTR) in Europa wird der Einsatzzeitpunkt und die Kapazität der ersten Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation optimiert, soweit dies beim heutigen Stand der Technik möglich ist. Als optimal wurde eine Kapazität berechnet, die ausreicht, 50.000 MWe-HTR-Leistung zu bedienen. Diese Anlage soll 1989 in Betrieb genommen werden. Zur Überbrückung des Zeitraumes bis 1989 werden hier 4 Varianten zur teilweisen Schließung des Brennstoffkreislaufs alternativ gegenübergestellt.

Diese Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit den Firmen HRB Mannheim und NUKEM Hanau/Wolfgang durchgeführt.

*jetzige Anschrift: BONNENBERG + DRESCHER
Ingenieurgesellschaft mbH
5173 Schleiden/Aldenhoven
Landstraße 20 (B1)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einführung	1
1.1 Kurzfassung der "Studie zur Schliessung des HTR-Brennstoffkreislaufs"	1
1.2 Ziel der Systemanalyse	2
2. Problemstellung	3
2.1 Optimierung einer Großanlage im Gleichgewichtsmarkt	6
2.2 Übergangslösungen in der Marktanlaufphase	9
2.3 Erfassung der Vergleichsgrößen	12
3. Forderungen an die Systemlogik	14
3.1 Vollständige Alternativen in der Investitionsrechnung	14
3.2 Erfassung der Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage	16
3.2.1 Flexible Ausgaben- und Einnahmenströme der Großanlage, Modell I	18
3.2.2 Starre Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage, Modell II	23
3.3 Zusammenstellung aller Bar- und Absolutwerte zum alternativen Vergleich	24
3.3.1 Spezifische Vergleichswerte des Gleichgewichts- marktes	24
3.3.2 Spezifische Vergleichswerte der Marktanlaufphase	25
3.3.3 Mehrkosten der einzelnen Varianten	27
4. Technologie des HTR-Brennstoffkreislaufs	29
4.1 Referenz-Brennelement und -Zyklus	29
4.2 Einzelbeiträge zur technischen Projektierung und Kostenberechnung	30
4.2.1 Transport	30
4.2.2 Lagerung von Kernbrennstoffen	31
4.2.3 Head-End-Zelle	32

	Seite
4.2.4 WAK	32
4.2.5 Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation	33
5. Kaufmännische Randbedingungen	34
6. Vorstellung der Ergebnisse	36
6.1 Trendanalyse der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt	36
6.2 Ergebnisse der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt	40
6.3 Optimierung der Übergangslösung	46
7. Programmbeschreibung	53
Literaturverzeichnis	68
Anhang	

ABKÜRZUNGEN

ABS	Absolutwert
BAR	Barwert zum 1.1.1982
XABS	spez. Absolutkosten
XBAR	spez. Barwertkosten
XVAR	spez. Kosten für Übergangsphase der Varianten
XSTAT	spez. Kosten für Uranzins, Transport und Zwischenlager im stationären (vollentwickelten) Markt
XGA 1	spez. Kosten für Wiederaufarbeitung und Refabrikation der 1. Großanlage
XGA 2	spez. Kosten für Wiederaufarbeitung und Refabrikation im vollentwickelten Markt
A	Ausgaben
$BER_{VAR, EU + USA}$	Anzahl der refabrizierten BE im gesamten Betrachtungszeitraum der Variante (bis 12 A nach Inbetriebnahme von GA 1)
$BER_{VAR, EU}$	Anzahl der in Europa refabrizierten BE im Betrachtungszeitraum der Variante
BER_{STAT}	Anzahl der refabrizierten BE für den Betrachtungszeitraum im vollentwickelten Markt (bis 12 A nach Inbetriebnahme GA 2)
HE	Head-End
ASLA	Aschelager
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
URLA	Uranlager
TR	Transport
BELA	Brennelementzwischenlager
USA	Transport und Aufarbeitung in den USA
URZ	Uranzinsen

Abkürzungen Forts.

GA 1, GA_X

1. Großanlage in Europa

GA 2, GA_{OPT}

Großanlage im vollentwickelten Markt

*

Diskontierungszins 8%

**

Diskontierungszins 20%

T_X , T_{OPT}

Einsatzzeitpunkt der GA_X , bzw. GA_{OPT}

1. Einführung

Die "Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs"[1], ein vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördertes Forschungsvorhaben, wird von einer Arbeitsgemeinschaft, bestehend aus HRB, NUKEM und KFA durchgeführt, wobei die Federführung bei NUKEM liegt. Im Rahmen dieser Studie werden Alternativvorschläge zur vorläufigen und endgültigen Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs entworfen und miteinander verglichen.

1.1 Kurzfassung der "Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs"

Eine Zusammenfassung der "Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs", für die die vorliegende Systemanalyse ein essentieller Beitrag ist, wird zum besseren Allgemeinverständnis hier vorausgeschickt.

Ausgehend von den Marktprognosen für Hochtemperatur-Reaktoren in Europa wird der Einsatzzeitpunkt und die Kapazität der ersten Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation optimiert, soweit dies beim heutigen Stand der Technik möglich ist.

Wenn der HTR mit Thorium-Zyklus bis 1990 20% des Kernenergiemarktes erreicht, muß 1989 die erste europäische Großanlage zur Wiederaufarbeitung ihren Betrieb aufnehmen. Zu dieser Zeit sind ca. 28.000 MWe-HTR-Leistung installiert. Als optimal wurde eine Kapazität berechnet, die ausreicht, 50.000 MWe-HTR-Leistung zu bedienen. Dabei wurde angenommen, daß die Anlage aus technischen Gründen im ersten Betriebsjahr mit 50 %, im zweiten mit 75 % und im dritten mit ihrer vollen Kapazität ausgelastet werden kann. Bei voller Auslastung hat sie jährlich 350 t Schwermetall aufzuarbeiten und 15 t U-233 zu refabrikieren. Dabei ist ein Jahresumsatz von ca. 430 Mio DM zu erwarten. Im Prinzip kann man auch eine kleinere Anlage für beispielsweise 30.000 MWe früher einsetzen. Das wirkt sich ungünstig auf die spezifischen Aufarbeitungskosten aus. Die Anlage wäre bereits 1990 zu klein. Der Bau einer kleineren Anlage wäre jedoch zu empfehlen, wenn die Marktentwicklung hinter den Erwartungen zurückbliebe.

Für die Phase bis zur Errichtung der ersten Großanlage muß eine Übergangslösung gefunden werden. Mehrere Varianten wurden untersucht. Hierbei erweist

sich die Lagerung der Brennelemente als kostengünstigste Lösung. Sie hat den Nachteil, daß durch sie kein know how in der BRD und Europa für den Bau und Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage erworben wird. Dieses erhält man durch die Errichtung einer Prototypanlage zur Verbrennung des Graphits (Head End) als auch durch den Umbau einer vorhandenen Wiederaufarbeitungsanlage, z.B. der WAK. Um rechtzeitig mit Prototypanlagen know how in Europa zu gewinnen, müßte man alsbald mit der Entwicklung und Planung beginnen. Als weitere Variante wurde der Transport der abgebrannten Brennelemente in die USA untersucht. Diese Variante bietet den Vorteil, daß zu einem frühen Zeitpunkt der äußere Brennstoffkreislauf für Europa und die BRD geschlossen werden kann. Sie ist jedoch vergleichsweise teuer und bietet kaum die Möglichkeit, technisches know how zu erwerben.

1.2 Ziel der Systemanalyse

Die vorliegende Arbeit "Systemanalyse" hat die Aufgabe, der "Studie zur Schließung des HTR-Brennstoffkreislaufs" auf der Basis eines betriebswirtschaftlich fundierten Konzepts ein Rechenprogramm zu erstellen, das alle vernünftigen Lösungen zur Schließung des Brennstoffkreislaufs erfaßt und miteinander vergleichbar macht. Die große Anzahl der variablen Eingabeparameter, wie z.B. verschiedene Marktprognosen für HTR-Zubauraten, unterschiedliche Zinsniveaus usw. verlangen ein Durchspielen von sich wiederholenden Rechengängen und rechtfertigen somit ein Computerprogramm.

Diese Systemanalyse stellt zuerst die verschiedenen Übergangsvarianten und die endgültige Schließung des Brennstoffkreislaufs vor, untersucht dann ihre betriebswirtschaftliche Vergleichbarkeit und liefert schließlich mit Hilfe einer Zielfunktion den numerischen Algorithmus zur Computerlösung. Eine Ergebnisdarstellung zeigt den Vergleich aller durchgerechneten Lösungsmöglichkeiten, wobei eine Konvergenzbetrachtung des aufgestellten Gleichungssystems mit einer Sensibilitätsanalyse einbezogen wird. Die Programmbeschreibung mit vereinfachten Strukturplänen folgt am Schluß dieses Berichtes.

2. Problemstellung

Da die Markteinführung des HTR unter dem Kostendiktat des Leichtwasserreaktors steht, gilt es, die Voraussetzungen eines möglichst wirtschaftlichen Einsatzes des HTR zu finden. Hierzu gehört die Rückführung des erbrüteten Brennstoffs zum Reaktor, was einen geschlossenen Kreislauf mit Head-End-Zelle, Wiederaufarbeitungs- und Refabrikationsanlagen, Transportbehälter für abgebrannte und refabrizierte Brennelemente und Lagermöglichkeiten voraussetzt.

Da alle Brennstoffzykluskosten vom Durchsatz, d.h. von der Menge der angefallenen abgebrannten Brennelemente und somit wiederum von der Anzahl der in Betrieb genommenen HTR abhängen, werden die in Abb. 1 dargestellten Prognosen als variable Parameter in das Rechenprogramm eingelesen. Dabei stellt die Kurve 1 eine europäische Marktprognose dar, während Kurve 2 eine Aussage für die BRD wiedergibt. Die Kurve 3 soll die Reaktion des Systems auf extreme, hier pessimistische, Annahmen erfassen.

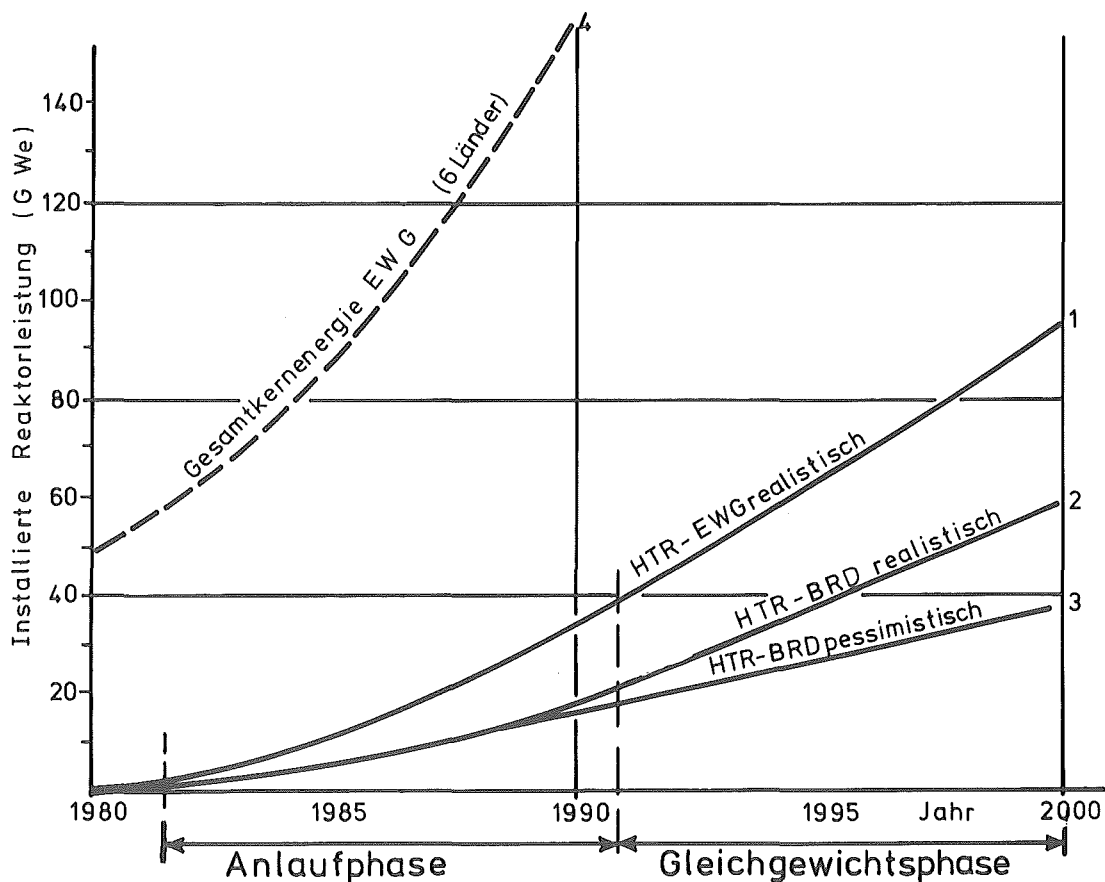
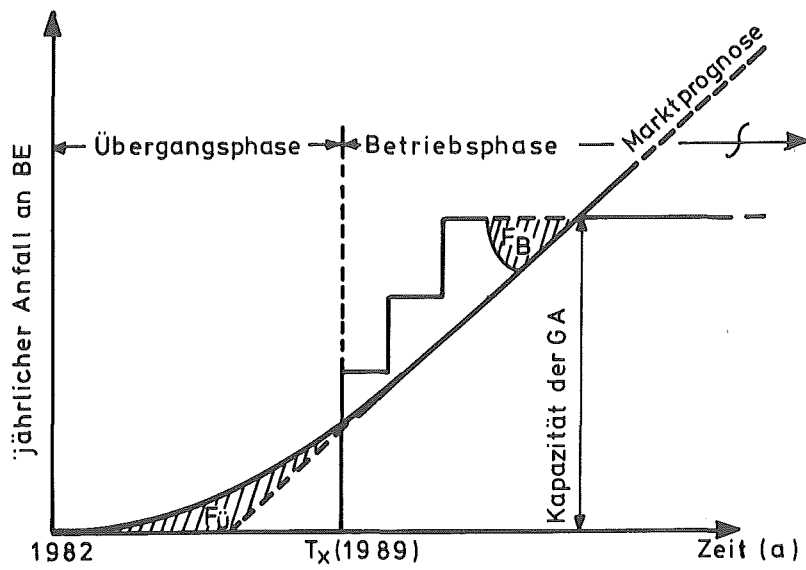
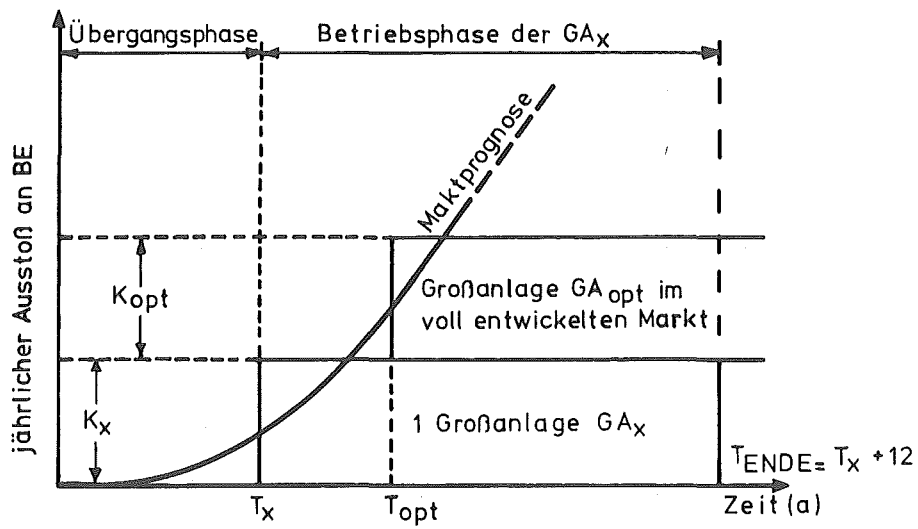


Abb. 1 Marktprognosen für den HTR



a) Zeitliche Zuordnung der beiden Großanlagen



b) Zeitlicher Anfall der Mehrkosten F_U und F_B

Abb. 2 Schema der Problemstellung

Die drei Kurven haben einen analogen Verlauf: nach einer Anlaufphase (Markt geringer Zubauraten) folgt eine Gleichgewichtsphase, gleich der Phase linearen Marktwachstums. In dieser zweiten Phase, beginnend etwa ab Ende 1991, wird die Industrie eine, wahrscheinlich multinationale, Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation bauen. Die Menge des zu erwartenden Durchsatzes dieser Phase erlaubt hier eine Ausnutzung der Kostendegressionen zu tragbaren spezifischen Brennstoffkreislaufkosten. In dieser zweiten Phase wird also die endgültige Lösung zur Schließung des Brennstoffkreislaufs zu erwarten sein.

Es wird aber damit gerechnet, entsprechend dem Kenntnisstand zum Stichtermin der Studie (1.7.1972), daß in den Jahren 1975/76 die Bauphase des ersten großen HTR mit einer Leistung von 1160 MWe beginnt. Die ersten abgebrannten Brennelemente fallen, sofern der Reaktor 1980 zu arbeiten anfängt, bereits Ende 1981 an. Sie müssen also während der Marktanlaufphase bis zu dem Zeitpunkt T_X in irgendeiner Form in dem Brennstoffkreislauf gelagert werden, in dem die Summe aller aufgelaufenen und neu anfallenden Brennelemente einen wirtschaftlichen Einsatz der ersten kommerziellen Großanlage garantiert. Für diese Zeitspanne gilt es, eine kostenoptimale Übergangslösung zu finden. Die Abb. 2 zeigt die zeitliche Zuordnung der beiden zu optimierenden Großanlagen GA_X und GA_{OPT} .

Somit ergeben sich für die Systemanalyse folgende Probleme:

1. Optimierung der Kapazität einer kommerziellen europäischen Großanlage GA_{OPT} und ihres Einsatzzeitpunktes T_{OPT} unter Zugrundelegung der Verhältnisse des Gleichgewichtsmarktes (siehe Abb. 1 und Abb. 2).
2. Bestimmung einer - evtl. kleineren - Großanlage GA_X und ihres Einsatzzeitpunktes T_X in dem Zeitraum geringer Zubauraten unter Beachtung zweier Voraussetzungen:
 - a) kostenminimalste Übergangsphase vom 1.1.1982 bis T_X , also möglichst geringe Mehrkosten gegenüber dem vollentwickelten Markt, und
 - b) maximale Auslastung dieser Großanlage GA_X während ihrer Betriebsphase.

Aus Punkt 2 a ergibt sich, daß die spezifischen Kosten der Großanlage, die wiederum eine Funktion des Auslastungsgrades und somit ihres Einsatzzeitpunktes sind, von dem aufzustellenden Simulationsmodell selbst zu errechnen sind. Daher muß bei Problem 1 und 2 der Betrachtungszeitraum die gesamte Betriebsphase der jeweiligen Großanlage mit erfassen. Die sich daraus ergebenden Forderungen an die Investitionsrechnung werden in Abschnitt 3.2 berücksichtigt.

2.1 Optimierung einer Großanlage im Gleichgewichtsmarkt

Die Optimierung der Großanlage GA_{OPT} geht hier von einer gegebenen konstanten Zuwachsrate von HTR aus. Die Endkapazität EKAP der Großanlage, die gleich der jeweiligen vorgegebenen Kapazität bei Vollauslastung ist, und ihr Einsatzzeitpunkt T sind variierbar (Abb. 3). Es wird die Kombination von $EKAP_{OPT}$ und T_{OPT} gesucht, bei der eine in Abschnitt 3 definierte Zielfunktion ihr Optimum hat.

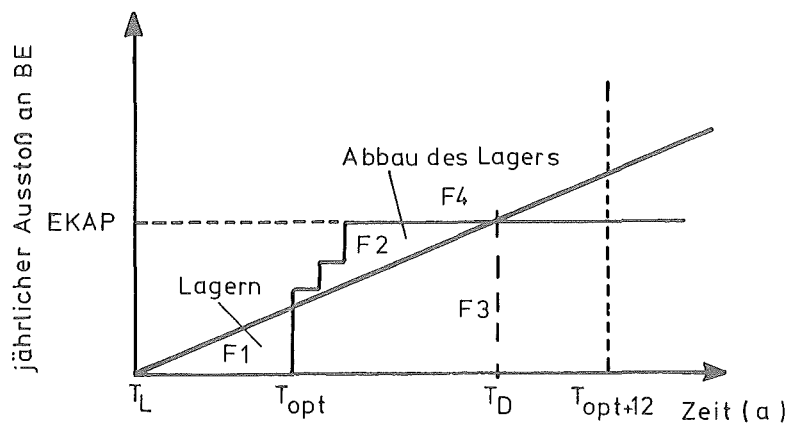


Abb. 3

Erläuterung zur Optimierung der Großanlage

(T_{opt} : optimaler Einsatzzeitpunkt; $T_{opt}+12$: Ende der Betrachtungszeit; T_D : Anfang der Unterdimensionierung der GA_{OPT})

Unter Annahme der Kurven 1 bis 3 in Abb. 1 fallen die ersten Brennelemente im Gleichgewichtsmarkt Anfang 1992 an, ungefähr 1,5 Jahre nach der Inbetriebnahme der entsprechenden Reaktoren. Sie werden in geeigneten Transportbehältern in das Brennelementlager am Standort der später zu bauenden Großanlage GA_{OPT} transportiert und hier bis zum Zeitpunkt T_{OPT} gelagert. In der Großanlage wird das erbrütete U-233 gewonnen und in Form von refabrizierten Brennelementen in den gleichen Transportbehältern zum HTR zurücktransportiert.

Wie Abb. 3 schematisch zeigt, ist die Großanlage unterdimensioniert, d.h. es fallen jährlich mehr Brennelemente an, als die Großanlage verarbeiten kann. Es wird angenommen, daß die überschüssigen Brennelemente an dem noch unbekannten Standort einer später zu bauenden nächsten Großanlage gelagert werden. Alle Kosten, verursacht durch diesen Brennelementüberschuß, werden der nachfolgenden Großanlage zu Lasten gelegt und in diesem Modell somit weiterhin nicht mehr berücksichtigt.

Zur Vereinfachung der Kostenrechnung wurde der Begriff der Verrechnungseinheit (VE) eingeführt, der wie folgt definiert ist [1]:

1 VE ist die Menge Kernbrennstoff bzw. die entsprechende Menge an Brennelementen, Thorium, feed oder breed Material etc., die ein 1160 MWe HTR jährlich im Gleichgewicht abgibt oder aufnimmt. Danach enthält also im Mittel

1 VE "kalt" fabriziert:	630 blockförmige Brennelemente
1 VE "heiß" fabriziert:	356 blockförmige Brennelemente
1 VE abgebrannt	: 986 blockförmige Brennelemente;
die entsprechenden Schwermetallmengen enthält Tabelle 1.	

Alle Kostenkurven, siehe Anhang 1, die diesem Modell zugrunde liegen, sind in Verrechnungseinheiten VE parametrisiert; die allgemeinen Gleichungen und die einzelnen Programmteile des zu erstellenden Rechenprogramms geben die gleiche Substanzmenge einer VE mit dem Ausdruck 1 BE wieder, womit auch gleichzeitig die Anzahl der Reaktoren erfaßt wird, die diese Kosten verursachen.

Das Verhältnis von "heiß" zu "kalt" fabrizierten Brennelementen gibt wieder, wieviele Brennelemente zusätzlich neu gekauft werden müßten, wenn der Kreislauf nicht geschlossen wäre. Für die wieder in den Kreislauf zurückführbare

Uranmenge U-233, die in den abgebrannten Brennelementen gebunden ist, müssen daher mit Hilfe des obigen Verhältnisses Kapitalbindungskosten, kurz Uranzins, errechnet werden. Zur Erfassung der Höhe des Uranzinses wird berücksichtigt, daß ein Brennelement bei allen vier durchgespielten Lösungswegen den äußeren Brennstoffzyklus, sofern kein Zwischenlager besteht, in einem Jahr, gleich einer Abrechnungsperiode, durchläuft.

Es sind somit im Gleichgewichtsmarkt vier verschiedene Kostenströme zu berücksichtigen:

Transportkosten, Lagerkosten, Uranzins und Kosten der Großanlage.

Die Flächen F1, F2, F3 und F4 (Abb. 3) sind Maßzahlen des Einflusses dieser Kostenströme auf die gesuchte optimale $EKAP_{OPT}$ - T_{OPT} -Kombination der Optimierung.

F 1: Maßzahl für Uranzins, Transport- und Lagerkosten bis zum variablen Einsatzzeitpunkt T_{OPT} .

F 2: Maßzahl für die gleichen Kostenströme während der Zeitspanne des Lagerabbaus; da die Endkapazität der Großanlage in dieser Phase größer ist als die jährlich neu anfallenden Brennelemente, beides dimensioniert in VE pro Jahr, kann durch diese zeitlich begrenzte Überdimensionierung der Großanlage das Brennelementlager abgebaut werden.

F 3: Maßzahl der spezifischen GA-Kosten; die Kostendegression der Großanlage bewirkt, daß mit steigender Endkapazität, gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Fläche F 3, die spezifischen GA-Kosten sinken.

F 4: Maßzahl für den Auslastungsgrad der GA.

Zur Erreichung möglichst niedriger spezifischer Kosten stellt sich für die gesamte Optimierung ein Gleichgewichtszustand ein, in dem für die Flächen F 1 bis F 4 folgende Aussagen getroffen werden können:

1. $F_1 = F_2$, beide möglichst klein,
2. F_3 möglichst groß,
3. F_4 möglichst klein.

Der so gefundene Gleichgewichtszustand bestimmt die gesuchte $EKAP_{OPT}-T_{OPT}$ -Kombination, bei der die Summe der vier Kostenströme, berechnet bis zum Zeitpunkt T_{ENDE} und bezogen auf den Durchsatz des äußeren Brennstoffkreislaufs, der gleich der Anzahl der in diesem Zeitraum refabrizierten Brennelemente ist, ein Minimum darstellen. Alle errechneten spezifischen Werte aller $EKAP - T$ - Kombinationen werden in einer Matrix zur Auffindung des gesuchten zweidimensionalen Minimums abgespeichert. Der sich in dem Minimum eingependelte Auslastungsgrad Φ der Großanlage GA_{OPT} , zahlenmäßig erfaßt über das Flächenverhältnis (Abb. 3)

$$\Phi = \frac{(F_2 + F_3) - F_4}{(F_2 + F_3) + F_4} ,$$

wird einer späteren Erläuterung der Differenz der spezifischen Kosten der Großanlagen GA_{OPT} und GA_X zugrunde gelegt.

2.2 Übergangslösungen in der Marktanlaufphase

Zur Überbrückung der Zeitspanne von 1982, dem Anfall der ersten abgebrannten Brennelemente, bis zum Jahr T_X , dem Einsatz der ersten Großanlage GA_X in der Marktphase geringer Zubauraten gegen Ende der 80iger Jahre, werden vier folgende Varianten durchgerechnet, wobei die ersten beiden Varianten den Transport einer Teilmenge an Substanz nach USA vorsehen. (1)

Variante 1: Graphitverbrennung in einer Prototypanlage (Head End) (Abb. 4)

Es existiert eine Anlage zur Verbrennung des Graphits (Head End) mit einem Pufferlager für Blöcke auf der Eingangsseite. Das Produkt dieser Anlage ist der nun im Volumen reduzierte Kernbrennstoff, die Asche. Diese soll nach Untervariante 1.1 in einem Aschelager bis zur Inbetriebnahme der europäischen Großanlage (Knoxville, Ten.) wiederaufgearbeitet, refabriziert und nach Europa zurücktransportiert werden.

Sobald die Kapazität der Head-End-Anlage (HE) erschöpft ist, gehen die überschüssigen Brennelemente (BE) in das sogenannte

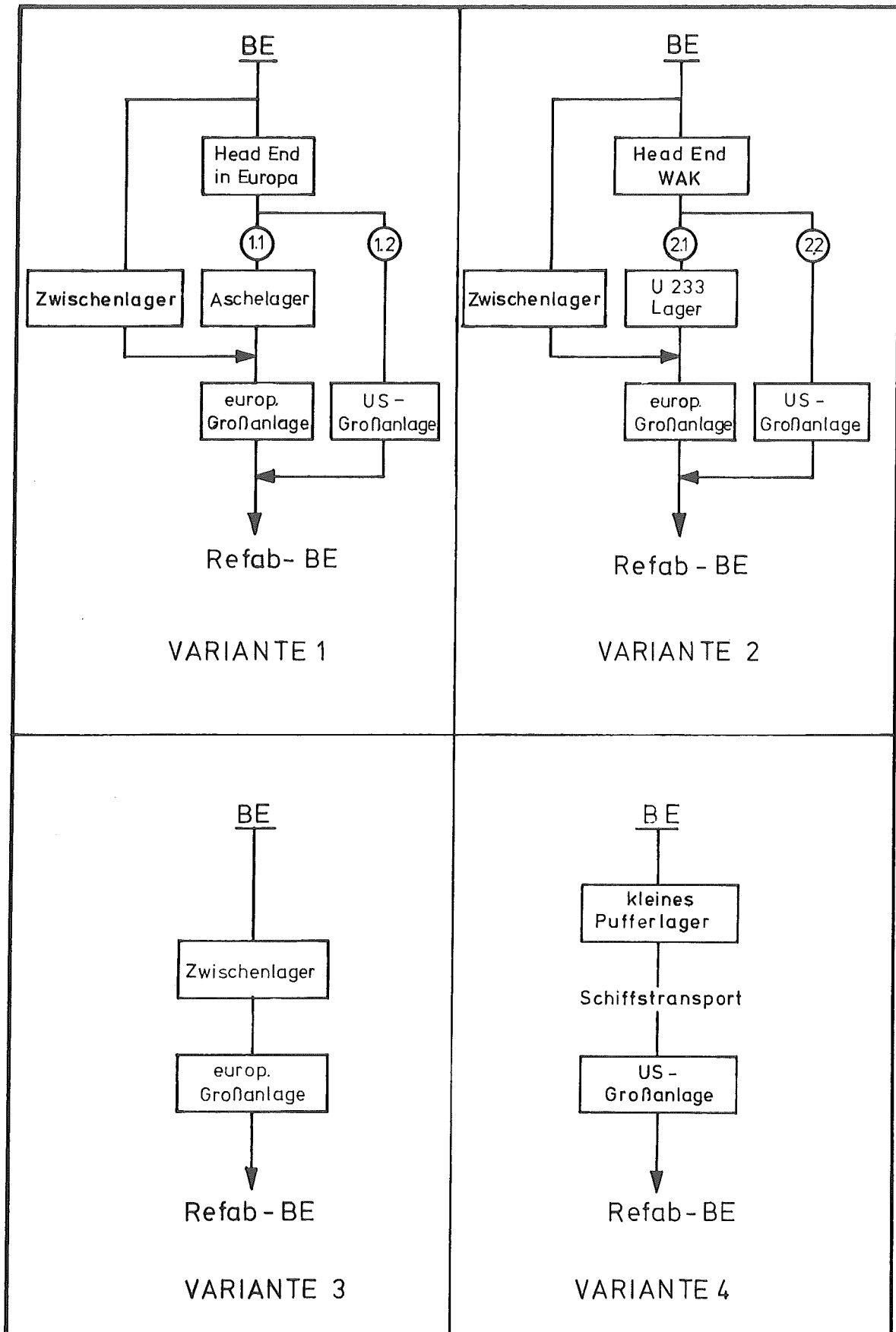


Abb. 4: Übergangslösungen

Zwischenlager der europäischen Großanlage.

Variante 2: Aufarbeitung in einer Prototypanlage (Umbau einer LWR-Anlage)
(Abb. 4)

Es wird angenommen, daß eine europäische Anlage für LWR-Brennstoff zur Verfügung steht, für HTR-Brennstoff umgerüstet worden ist und von einer auf benachbartem Gelände errichteten Head-End-Zelle mit bestrahltem Brutstoff (breed) versorgt wird. Diese Variante wurde am Beispiel der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) durchgerechnet, obwohl auch andere Anlagen, z. B. die EUROCHEMIC, in Betracht kämen.

Der Abbrandbrennstoff (feed) wird im vorhandenen Wasserbecken der WAK bis zur Aufarbeitung in der Großanlage zwischengelagert. Das Uran 233 wird nach Untervariante 2.1 bis zur Refabrikation in der europäischen Großanlage zwischengelagert oder gemäß 2.2 zur Refabrikation in die Großanlage der USA nach Fort Scott gebracht. Die refabrizierten Brennelemente werden wieder nach Europa zurücktransportiert, analog Variante 1.2.

Die verbleibende Thorium-Menge wird in der Übergangsphase entweder als Müll verworfen oder bis zum Zerfall des Thorium-230 18 Jahre lang gelagert und dann wiederverwendet. Die Kosten sind in beiden Fällen etwa gleich.

Die WAK-Studie (2) hat gezeigt, daß die WAK unter Umständen bis zu 4 Reaktoren bedienen kann entsprechend einer Leistung von ca. 5000 MWe. Die Variante 2 wird daher für die zwei Fälle berechnet, daß die WAK den jährlichen Brennstoffanfall aus 2 bzw. 4 Reaktoren verarbeiten kann. Sobald diese Anlagenkapazität erschöpft ist, werden die überschüssigen Elemente in das Zwischenlager am Standort der europäischen Großanlage transportiert.

Variante 3: Zwischenlagerung der Brennelemente (Abb. 4)

Bis zur Inbetriebnahme der europäischen Großanlage wird auf jegliche Wiederaufarbeitung verzichtet. Statt dessen wird ein größeres Zwischenlager für die abgebrannten Brennelemente gebaut. Es wird angenommen, daß der Standort der Großanlage dann bekannt ist und das Zwischenlager dort errichtet werden kann.

Variante 4: Brennelementtransport per Schiff in die USA

Alle Brennelemente, die bis zur Inbetriebnahme der europäischen Großanlage anfallen, werden in Knoxville ab 1984 aufgearbeitet. Das U-233 wird in den USA verkauft. Man kann auch daran denken, es in Form der refabrizierten Elemente wieder nach Europa zurückzutransportieren. Diese Möglichkeit bringt keine neuen Gesichtspunkte, da die Kosten ungefähr gleich sind.

Ein kleineres Zwischenlager für 4000 Brennelemente überbrückt die Zeit von 1982 bis zum Abtransport im Jahre 1983.

Nach Abb. 2 besteht jede Variante aus einer Übergangsphase und einer Betriebsphase. Die Übergangsphase beginnt mit Anfall der ersten abgebrannten BE, also Anfang 1982, das Ende dieser Phase und der Beginn der nächsten Phase werden mit T_X variabel bestimmt. Der Zeitpunkt T_{X+12} , festgelegt durch die Nutzungsdauer von 12 Jahren der GA, beendet die Übergangsphase. Der gesamte Planungshorizont, beeinflusst durch die mit T_X begrenzte Betriebsdauer von HE und WAK, beträgt minimal $4 + 12$ Jahre, maximal $9 + 12$ Jahre.

2.3 Erfassung der Vergleichsgrößen

Von den Brennstoffkreislaufkosten des Gleichgewichtsmarktes wird angenommen, daß sie von der Industrie unter normalen Marktbedingungen voll getragen werden können. Sie bilden somit das Vergleichsniveau für die Beurteilung der finanziellen Mehraufwendungen der verschiedenen Übergangsvarianten des anlaufenden Marktes. Die Differenz zwischen den Brennstoffkreislaufkosten des Gleichgewichtsmarktes und den Kosten der Übergangslösungen bestimmt die Höhe des Betrages der Mehraufwendungen, kurz Pönale. Diese Pönale, die den einzelnen Zwischenlösungen zu Lasten gelegt wird, setzt sich entsprechend des Schwerpunktes ihres zeitlichen Anfalls aus zwei Summanden zusammen:

$$P_{GES} = P_0 + P_B.$$

Die Übergangsphase, gleich der Zeitspanne vom Anfall der ersten Brennelemente bis zum Einsatzzeitpunkt T_X der ersten Großanlage, verursacht gegenüber den Kostenströmen des Gleichgewichtsmarktes der entsprechenden Zeitspanne bis zum Zeitpunkt T_{OPT} der zweiten Großanlage die Mehrkosten P_0 , repräsentiert durch die Fläche F_0 in Abb. 2. Die Zusatzkosten P_B werden durch die unterschiedlichen spezifischen Kosten für Wiederaufarbeitung und Refabrikation der beiden

Großanlagen während der Betriebsphase verursacht. Ihre Entstehung kann bei der allgemeinen Annahme, daß die beiden Endkapazitäten der Großanlage unterschiedlich sind, sehr vielschichtig sein; die Differenz der spezifischen Kosten der beiden Großanlagen ist bei unterschiedlicher Endkapazität eine Funktion der Kostendegression, bei gleicher Endkapazität eine Funktion des sich ändernden Auslastungsgrades PHI .

Wird einmal angenommen, was später durch die Ergebnismatrix bestätigt wird, daß die beiden Großanlagen die gleiche Endkapazität haben, lassen sich die Mehrkosten P_0 und P_B durch die Flächen F_0 und F_B in Abb. 2 darstellen. Die Mehrkosten P_B werden hier allerdings nur noch durch den schlechteren Auslastungsgrad der ersten Großanlage verursacht.

3. Forderungen an die Systemlogik

3.1 Vollständige Alternativen in der Investitionsrechnung

Die Betriebswirtschaft lehrt, daß in finanzwirtschaftlicher Sicht nur Investitionen alternativ miteinander verglichen werden dürfen, die sowohl in der Investitionssumme, d.h. der Höhe des investierten Kapitals, als auch in der Investitionsdauer, d.h. der Kapitalbindungsdauer, übereinstimmen. Somit ergeben sich sowohl für die Optimierung der Großanlage als auch für den Variantenvergleich analoge Probleme /9/:

1. Die Investitionssummen unterscheiden sich sehr stark (= Breiten- diskrepanz). Die Optimierung im Gleichgewichtsmarkt vergleicht Großanlagen mit Endkapazitäten, die sich im Extremfall um den Faktor 2 unterscheiden; entsprechend verhalten sich ihre Investitionssummen. Die einzelnen Varianten zur Überbrückung der Marktanlaufphase haben zum Teil sehr kapitalintensive Übergangslösungen, z.B. werden dem Bau einer Head-End-Zelle und der Umrüstung der WAK in Variante 2 die Investitionsarme Variante 3, nur Bau eines Brennelementzwischenlagers, gegenübergestellt.
2. Die Investitionsdauer ist eine Funktion der Einsatzzeit T_X bzw. T_{OPT} , die beide variabel eingelesen werden, somit hat jede hier zu unterscheidende Investitionsalternative einen anderen Planungshorizont (=Längendiskrepanz).
3. Die Anzahl der refabrizierten Brennelemente ist ein Maß für den Einnahmenstrom der jeweiligen Großanlage. Da die Kapazität der Großanlagen variabel angenommen wird, ändert sich auch mit ihrem Durchsatz die Breite des Einnahmenstroms, was wiederum bewirkt, daß dieser Einnahmenstrom von der Investitionsrechnung mit erfaßt werden muß /9/.
4. Die Breiten- und die Längendiskrepanz wirft die Problematik einer Differenzinvestition auf.

Folgende Schritte sollen zu einer Lösung führen:

1. Alle Ausgaben- und Einnahmenreihen werden auf ein Zeitzentrum abdiskontiert, d.h. es werden Barwerte gebildet.

2. Die Differenz der Summe aller abdiskontierten Einnahmen E und Ausgaben A, dividiert durch die Anzahl der abdiskontierten, refabrizierten Brennelemente BER, also bezogen auf den abdiskontierten Durchsatz, ist eine normierte Größe, die den Vergleich verschiedener Anlagen erlaubt, soweit garantiert ist, daß jede Anlage in ihrem Optimum arbeitet. Diese Forderung wird durch eine Untersuchung über die variablen T_X - bzw. T_{OPT} möglichst genau erfüllt, d.h. jede Anlage wird bei verschiedenen Auslastungsgraden durchkalkuliert und dann in ihrem Betriebsoptimum mit Analogon anderer Kapazitäten verglichen. Mit diesem Verfahrensschritt wird der Sprung aus der reinen Investitionsrechnung hin zum langfristigen, spezifischen Kostenvergleich gemacht.

Der Vergleichsquotient, zugleich auch die Minimierungsfunktion, lautet im allgemeinen Fall:

$$X_{\text{Vergleich}} = \frac{\sum_{I=1}^{T_{\text{ENDE}}} A * (I) - \sum_{I=1}^{T_{\text{ENDE}}} E * (I)}{\sum_{I=1}^{T_{\text{ENDE}}} (BER_{\text{EU}} (I) + BER_{\text{USA}} (I)) * (I)} \quad (1)$$

A (I) : laufende Ausgaben von HE, WAK, GA, ... der Periode I

E (I) : laufende Einnahmen der Periode I

BER (I) : Anzahl der refabrizierten Brennelemente

$BER_{\text{EU}} (I)$: Anzahl der in Europa refabrizierten Brennelemente

$BER_{\text{USA}} (I)$: Anzahl der in USA refabrizierten Brennelemente
(siehe USA-Untervariante)

* : Zeichen für abdiskontiert, stellvertretend für den Abdiskontierungsfaktor f_I , der im kommenden Abschnitt dargestellt wird.

$I = 1$: Die 1. Periode ist das Kalenderjahr, indem die ersten BE anfallen. Eine Periode hat somit die Dauer eines Jahres und entspricht einer Abrechnungsperiode. Alle Einnahmen und Ausgaben werden am Ende der laufenden Periode I abgebucht.

Die Gleichung (1) wird sowohl bei der Optimierung der Großanlage als auch bei dem Variantenvergleich modifiziert und dient als Vergleichsquotient zur Auffindung des gesuchten zweidimensionalen Minimums, wobei eine Achse, die Zeitachse, den Einsatzpunkt T_X

bzw. T_{OPT} als Parameter, die andere Achse die Kapazität EKAP der Großanlage als Laufparameter hat. In allen Fällen liefert die Rechnung eine Ergebnismatrix, in der jeder Quotientenwert $X_{Vergleich}$ den Zeitraum ab Periode $I = 1$ (Anfall der ersten Brennelemente) bis Periode $I = T_{ENDE}$ (Ende des Abschreibungszeitraums der Großanlage) erfaßt.

Da auch die USA-Übergangslösung, Variante 4, und die USA-Untervarianten, Variante 1.2 und 2.2, mit den europäischen vergleichbar sein müssen, wird der Brennelementfluß an wohl definierten, für alle Varianten konstanten Stellen erfaßt (Abb. 5). Aus Vergleichsgründen wird außerdem verlangt, daß die in den USA refabrizierten Brennelemente in den europäischen Brennstoffkreislauf wieder zurückgeführt werden.

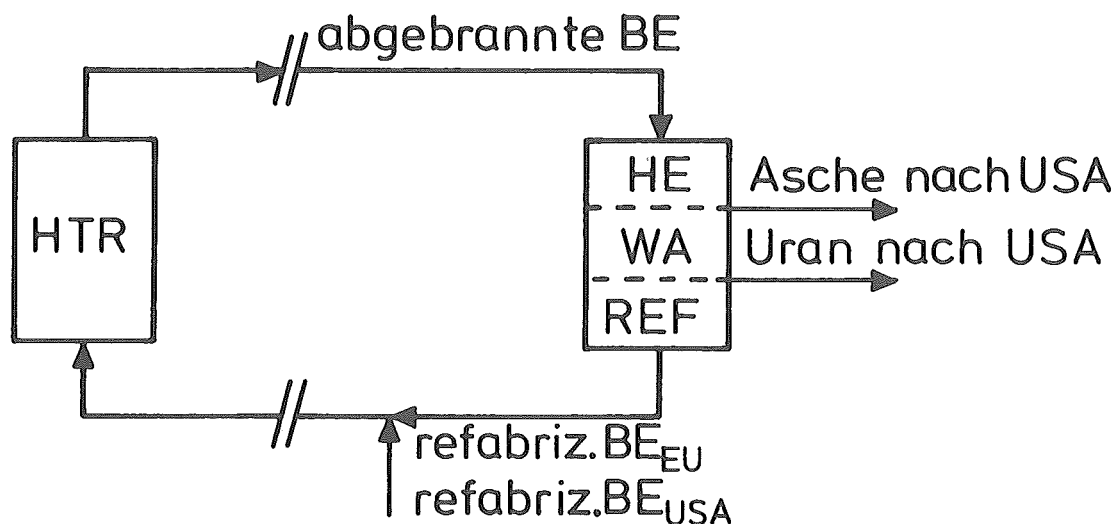


Abb. 5 Schema des äußeren Brennstoffkreislaufs

3.2 Erfassung der Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage

Während der Erarbeitung dieses Simulationsmodells kristallisierten sich zwei Wege zur Erfassung der Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage heraus.

Modell I:

Kalkulation einer Großanlage unter Beachtung der Finanzierungsart, d.h. vereinfachte Simulation der Vorgänge des finanzwirtschaftlichen Bereichs.

Modell II:

Abhandlung der Großanlage wie ein isoliertes Investitionsobjekt ohne Berücksichtigung der Fremdfinanzierung.

Zu Modell I: Das in der Großanlage investierte Gesamtkapital setzt sich aus Eigen- und Fremdkapital zusammen; es existiert somit ein jährlicher Ausgabenstrom in Höhe von 8 % des aktuellen Fremdkapitals, die Fremdkapitalzinsen. Von dem gesamten, in der Großanlage investierten Kapital, wird eine Rentabilität bestimmter Höhe verlangt; das wird erreicht, indem der Kalkulationszins, hier also der Sachzins der Unternehmung gleich dem Zins, mit dem alle Zahlungen auf das Zeitzentrum abdiskontiert werden, als variabler Parameter schrittweise um

$\Delta p = 2 \%$ verändert werden kann. Bei einem angenommenen, durchschnittlichen Eigenkapital- zu Fremdkapitalverhältnis von 1 : 1, einem Fremdkapital von 8 % und einem Kalkulationszins von 12 % erhält man eine Rendite des Eigenkapitals von 16 - 17 %.

In diesem Modell sind die ertragsabhängigen Steuern, die Kapitaltilgung sowie die Zinsen für Fremdkapital eine Funktion der Höhe des Einnahmenstroms, der nur durch ein dynamisches Modell erfaßt wird, das sich durch Rückkopplung auf einen stationären Endwert einpendeln kann.

Zu Modell II: Zur Vereinfachung der Problematik, wie auch zur übersichtlicheren Darstellung der Liquiditätssituation mit Hilfe des Discounted-Cash-Flow wurde das Modell II entwickelt. Beide Modelle können mit dem Programm durchgespielt werden.

Modell II behandelt keinen Ausgabenstrom "Fremdkapitalzins" und auch keine ertragsabhängigen Steuern; Eigenkapital und Fremdkapital unterliegen keiner unterschiedlichen Betrachtung. Alle Ausgaben- und Einnahmenströme werden mit demselben Zinssatz, der allerdings wieder variabel ist, abdiskontiert. Es wird somit der modelltheoretische Ansatz der Durchkalkulation einer Einzelinvestition unter Anwendung einer modifizierten internen Zinsfußmethode gemacht.

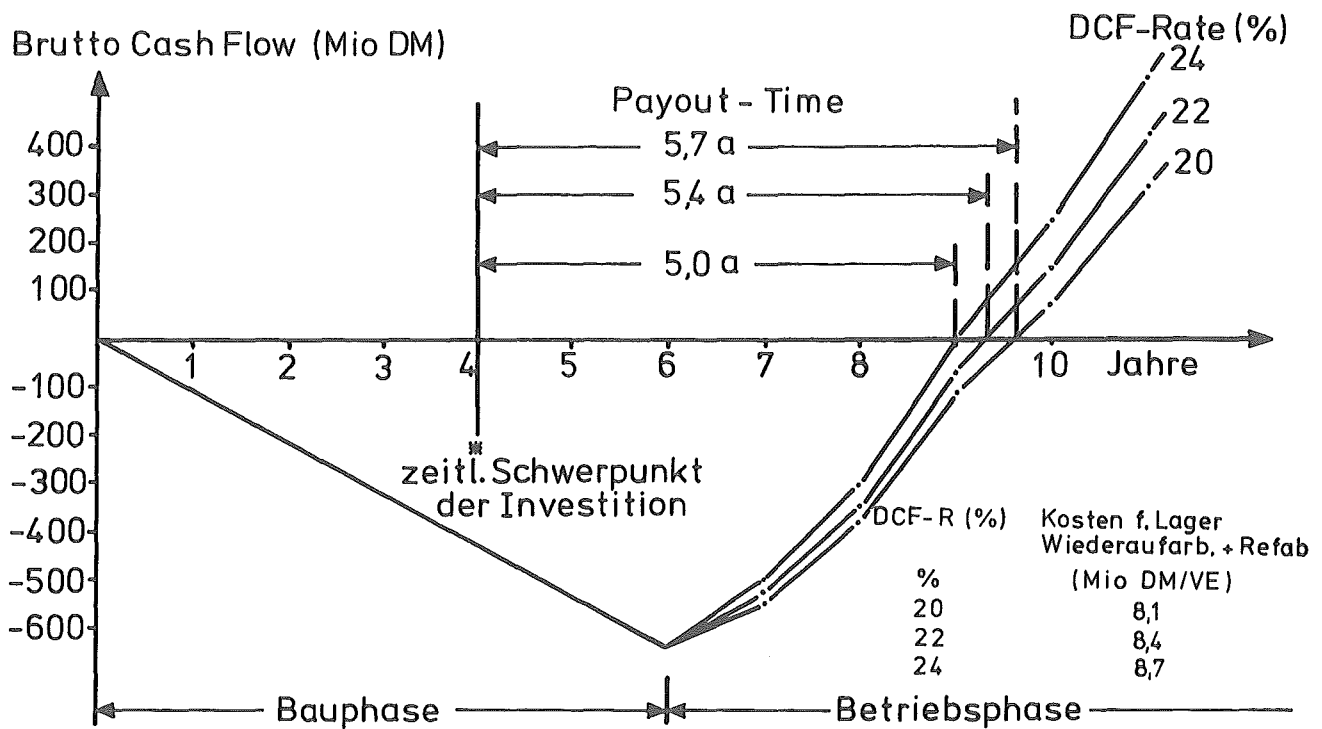


Abb. 6 Ermittlung der Payout-Time als Funktion der DCF-Rate

3.2.1 Flexible Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage, Modell I

Hier wird ein Extremfall durchgespielt, in dem angenommen wird, daß alle im Rahmen der Großanlage getätigten Zahlungen der ersten Abrechnungsperioden, also Investitionssumme, sowie laufende variable und fixe Betriebsausgaben, mit fremdem Kapital vorgenommen werden. Entsprechend den jährlichen Einnahmenüberschüssen, dem Cash-Flow, soll eine Fremdkapitaltilgung vorgenommen werden; die nach der Payout-Time auflaufenden Einnahmenüberschüsse werden gedanklich wieder zum Kalkulationszins angelegt.

Die ausgabenwirksamen Kosten und die Steuern werden in der Investitionsrechnung mit dem Ausdruck "Ausgaben" erfaßt. Da alle in einer Periode refabrizierten BE den äußeren Brennstoffzyklus auch in dieser Periode verlassen, muß kein Unterschied zwischen Erlös und Einnahmen gemacht werden.

Die GA hat einen Abschreibungszeitraum von 12 Jahren; T_X bzw. T_{OPT} sei der Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme, die erste Ausgabe ist die Anlageninvestition A (1) als Summe aller während der Bauzeit fälligen und auf T_X bzw. T_{OPT} aufgezinsten Zahlungen; die Ausgabenreihe wird von den jährlichen Betriebskosten,

den Zinsen für Fremdkapital und Umlaufkapital, den Steuern usw. fortgesetzt:

$$\begin{aligned} A(1) \cdot f(1) + A(2) \cdot f(2) + \dots + A(I) \cdot f(I) + \dots + A(N) \cdot f(N) = \\ = \sum_{I=1}^N A(I) \cdot f(I) = \sum_{I=1}^N A^*(I) \end{aligned} \quad (2)$$

mit $N = 12$: Nutzungsdauer der GA.

Der Abdiskontierungsfaktor $f(I)$ lautet:

$$f(I) = \frac{1}{(1+p)^m} = \frac{1}{q^m}; \quad m = (-k + I) \quad (3)$$

k = zeitlicher Abstand der ersten Ausgabe vom Zeitzentrum

p = Abdiskontierungszinssatz oder Kalkulationszinssatz.

Die Einnahmenreihe beginnt mit dem Verkauf der ersten refabrizierten Brennelemente BER:

$$\begin{aligned} E(1) \cdot f(1) + E(2) \cdot f(2) + \dots + E(I) \cdot f(I) + \dots + E(N) \cdot f(N) = \\ = \sum_{I=1}^N E(I) \cdot f(I) = \sum_{I=1}^N E^*(I) \end{aligned}$$

Die Einnahme $E(I)$ ist das Produkt aus Anzahl der refabrizierten Brennelemente BER(I) und ihrem spezifischen Markterlös XM, der über alle Abrechnungsperioden I konstant ist. Somit ergibt sich die Einnahmenreihe:

$$\begin{aligned} XM \cdot BER(1) \cdot f(1) + \dots + XM \cdot BER(I) \cdot f(I) + \dots + XM \cdot BER(N) \cdot f(N) = \\ = XM \cdot \sum_{I=1}^N BER(I) \cdot f(I) = XM \cdot \sum_{I=1}^N BER^*(I) \end{aligned} \quad (4)$$

Der Zahlungszeitplan der Einnahmen ist also durch den zeitlichen Anfall der refabrizierten Brennelemente festgesetzt.

XM ist im Rahmen dieser Systemanalyse eine unbekannte Größe und muß zur Fixierung der Einnahmenreihe bestimmt werden. Setzt man voraus, daß der Kalkulationszins gleich dem Abdiskontierungszinssatz und gleich dem Zins-

satz für langfristige Gelder auf dem Kapitalmarkt ist (0,08), beinhaltet die Gleichsetzung der Gleichungen (2) und (4), also Barwert der Einnahmen gleich dem Barwert der Ausgaben, einen Kapitalwert gleich Null, wobei unterstellt wird, daß die Einnahmen sich zum gleichen Zinssatz verzinsen. Sieht man von dieser Mindestverzinsung ab, würden bei Erzielung von XM am Markt gerade die Selbstkosten gedeckt werden:

$$\sum_{I=1}^N A^*(I) = XM \sum_{I=1}^N BER^*(I), \text{ daraus folgt:}$$

$$XM = \frac{\sum_{I=1}^N A^*(I)}{\sum_{I=1}^N BER^*(I)} = \frac{\sum_{I=1}^N A(I) \cdot q^{-(k-I)}}{\sum_{I=1}^N BER(I) \cdot q^{-(k-I)}} \quad (5)$$

In dem Computer-Programm wurde angenommen, daß alle Ausgaben und Einnahmen einer Abrechnungsperiode I am Jahresende anfallen. Der spezifische Wert XM bleibt fest, wenn der Schwerpunkt der jährlichen Einnahmen und Ausgaben auf Jahresmitte verlegt wird, denn es ändert sich nur der Exponent der Größe q und zwar im Nenner und im Zähler gleich. Die Änderung kann als Konstante $q^{1/2}$ in beiden Fällen vor die Summe gezogen werden und kürzt sich somit heraus. Den gleichen Einfluß hätte eine Verlegung des Zeitzentrums T auf XM.

Eine der Forderungen an die Systemanalyse ist die Kalkulation der GA unter der kommerziellen Bedingung, daß das investierte Kapital, sei es Fremd- und/oder Eigenkapital, eine höhere Verzinsung als die oben erwähnte Mindestverzinsung verlangt. Der Zinssatz p wird stufenweise um $\Delta p=2$ erhöht. Da der zeitliche Schwerpunkt der Ausgaben vor dem Schwerpunkt der Einnahmen liegt, erfahren dabei Zähler und Nenner des Vergleichsquotienten XM verschiedene Betragsänderungen; die Einnahmen werden stärker abdiskontiert wie die Ausgaben. XM wird somit bei steigendem Zinssatz p größer. Das bedeutet, daß die spezifischen Kosten XM mit dem Kalkulationszinssatz wachsen.

Ziel der Berechnung ist abweichend von der üblichen Praxis die Ermittlung des Preises XM bei vorgegebenem Zinsfuß p. Normalerweise wird der Zinsfuß in Abhängigkeit vom vorgegebenem Preis berechnet. Beide Methoden liefern bei verschiedenen Marktgegebenheiten den gleichen XM - p - Verlauf. Somit sind

die Beträge der Einnahmenströme nicht nur von der Anzahl der refabrizierten Brennelemente BER, sondern auch von dem finanzwirtschaftlichen Betriebsziel der GA, also z. B. von dem Sachzins, abhängig (Abb.:10).

Folgender Ausdruck erfaßt die Zinsbelastung aufgrund des Fremdkapitals der GA:

$$\text{Aktuelle Schulden} = \sum_{I=1}^{I=\text{Aktuell}} (A(I) - E(I)) = \sum_{I=1}^{I=\text{Aktuell}} (A(I) - X_M \cdot \text{BER}(I)) \quad (6)$$

$$\text{Fremdkapital-Zins} = \text{Aktuelle Schulden} \cdot 0,08. \quad (7)$$

Die Gleichungen (6) und (7) sind im Computermode11 so programmiert, daß die laufenden Ausgaben A (I) die Fremdkapital-Zinsen vorangegangener Perioden beinhalten. Nach ungefähr sieben Abrechnungsperioden (bei $p = 0,12$) werden die aktuellen Schulden gleich Null, da die Summe aller Einnahmen ab dieser Periode gleich bzw. größer als die Summe aller Ausgaben ist.

Die Gleichung (6) besagt, daß die aktuellen Schulden der Periode I gleich den aktuellen Schulden der Periode I-1 minus dem Cash-Flow der Periode I sind. Die Zeitspanne, in der der Betrag gegen Null geht, ist die Pay-Off-Periode. Die Länge dieser Zeitspanne ist umgekehrt proportional dem Kalkulationszinsatz.

Die Gleichung (6) setzt aber voraus, daß X_M schon ab der ersten Periode $I = 1$ bekannt ist, wogegen aus Gleichung (5) hervorgeht, daß X_M erst am Ende der letzten Periode $I = N = 12$, also am Ende des Abschreibungszeitraums - hier gleich der technischen Nutzungszeit - errechnet werden kann. Mit anderen Worten sind ein Teil der Ausgaben A (I) z. B. Zinszahlungen, bestimmte Steuern der Gleichung (5) von ihrem Ergebnis X_M abhängig; das entspricht einer Gleichung mit zwei Unbekannten.

Folgender Lösungsweg wird eingeschlagen:

Ein Planungszeitraum, als Summe aller Abrechnungsperioden, wird mehrmals hintereinander durchgerechnet, wobei nur X_M ceteris paribus nach dem unten beschriebenen Schema geändert wird. Bei dem ersten Rechengang $J = 1$ steht dem System noch kein Betrag für X_M zur Verfügung, d.h. der Einnahmenstrom ist gleich Null. Daraus resultiert, daß alle Zahlungen mit Fremdkapital getätigt werden, daß der Ausgabenstrom für Fremdkapitalzins somit unrealistisch hoch, und daß der in dem Rechengang $J = 1$ errechnete Wert X_M ($J = 1$) ebenfalls zu hoch wird.

Es muß also ein weiterer Durchgang $J + 1$ folgen, wobei dessen Einnahmenströme, mit $XM (J = 1)$ errechnet, über den zu erwartenden stationären Einnahmenströmen liegen, was eine zu schnelle Tilgung des Fremdkapitals mit zu niedrigen Ausgaben für Fremdkapitalzins zur Folge hat. Der Wert $XM (J = 1)$ wird also zu niedrig, er liegt unter dem zu erwartenden stationären XM (siehe Abb. 7).

Nach ungefähr sieben Durchgängen erfüllt die Optimierung folgende Bedingung:

$$|XM (J) - XM (J - 1)| < XM (J) \cdot 0,01$$

Der aktuelle Wert $XM (J)$ ist der gesuchte stationäre Wert und geht als spezifische Größe, die den Einfluß der GA auf alle Kostenströme erfaßt, in die weitere Rechnung ein. Die Optimierung im Gleichgewichtsmarkt und jede Übergangsvariante haben verschiedene Endwerte XM , die mitbestimmend für das Endergebnis der gesamten Brennstoffkreislaufkosten sind.

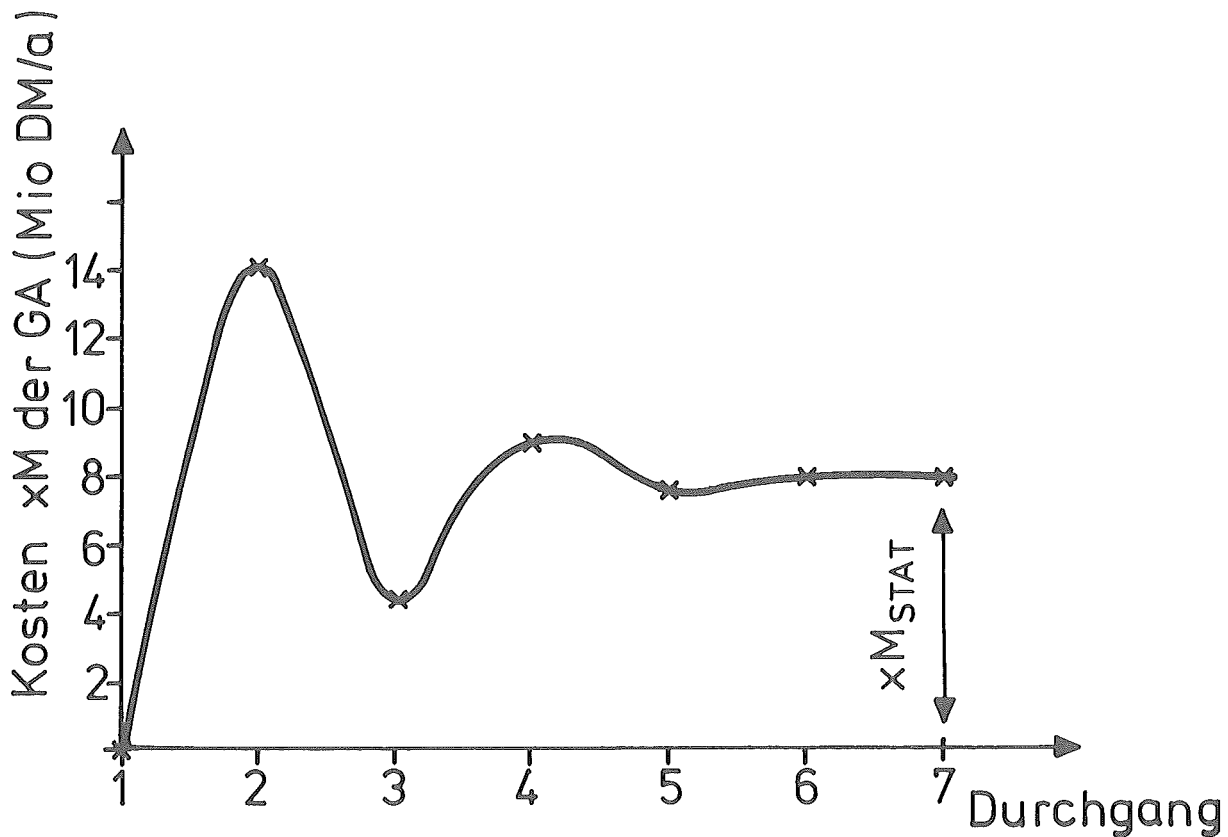


Abb. 7 Berechnung des stationären Betrags XM

3.2.2 Starre Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage, Modell II

In diesem Modell werden die Ausgabenströme ohne Fremdkapitalzins und nur mit den in Abschnitt 5 aufgezählten Steuern entsprechend ihrem zeitlichen Anfall während der gesamten Nutzungsdauer registriert.

Die Einnahmenströme werden mit Hilfe der Anzahl der refabrizierten Brennelemente ebenfalls zeitlich fixiert. Beide Ströme werden mit dem Abdiskontierungsfaktor, siehe Gleichung (3) Abschnitt 3.2.1, auf das Zeitzentrum abgezinst. Unter Anwendung der Gleichung (5) erhält man den spezifischen Preis, d.h. die Summe aus spezifischen Wiederaufarbeitungs- und Refabrikationskosten, als Funktion des variablen Zinssatzes p .

Da die Ausgabenströme weder Zahlungen in Höhe der Abschreibungsgegenwerte noch Rückstellungen oder Ersatzinvestitionen beinhalten, was bedeutet, daß keine versteckten Gewinne existieren, kann der obige variable Zinssatz p auch als Discounted-Cash-Flow-Rate (DCF-Rate) bezeichnet werden.

Formal, d.h. im Rechenablauf, unterscheidet sich Modell II von Modell I nur durch das Fehlen des Fremdkapitalzinses und durch einen anderen Ansatz zur Erfassung der Steuern. Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Rechenschritte müssen hier nur zweimal durchlaufen werden, um die Bedingungen

$$/ XM(J) - XM(J - 1) / < XM(J) \cdot 0,01$$

zu erfüllen. Der zweite Durchgang dient nur einer rechentechnischen Kontrolle und hat keine betriebswirtschaftliche Bedeutung.

Die Großanlage GA_{OPT} des Gleichgewichtsmarktes sowie die Großanlage GA_X der Variante 3, Zwischenlagerung der Brennelemente bzw. der Variante 4, Brennelementtransport in die USA, kennen als Input-Strom nur abgebrannte Brennelemente. Dagegen besteht bei der Großanlage GA_X der Variante 2 ein Teil der anfallenden Substanz aus einer Uranylinitratlösung als Output der WAK. Die dadurch hervorgerufenen unterschiedlichen Kosten werden in Modell I und Modell II der Großanlage mitberücksichtigt.

der Variante 2, WAK, in Abschnitt 2.2, treten während der Übergangsphase neben den schon bekannten Ausgaben für Uranzins A_{URZ} , für das Brennelementzwischenlager A_{BELA} und den verschiedenen Transportkosten A_{TR} noch die Ausgaben der Head-End-Zelle A_{HE} , der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe A_{WAK} und des Uranlagers A_{URLA} auf. Diese Ausgabenströme zur Finanzierung der Übergangslösung WAK unterliegen keiner kommerziellen Kalkulation, sondern werden entsprechend der Barwertmethode mit 8 % auf das Zeitzentrum, den 1.1.1982 abdiskontiert. Dagegen wird der Ausgabenstrom $A_{GA\ 1}$ der ersten Großanlage, der in der Betriebsphase auftritt, entsprechend der DCF-Rate abdiskontiert. Analoge Aussagen lassen sich für alle weiteren Varianten machen. Somit sieht die allgemeine Gleichung zur Erfassung des spezifischen Barwertes aller Varianten und Untervarianten wie folgt aus:

$$\begin{aligned}
 X_{GES\ BAR,VAR} &= \frac{(A_{HE} + A_{ASLA} + A_{WAK} + A_{URLA} + A_{USA} + A_{TR} + A_{BELA} + A_{URZ})^*}{BER_{VAR, EU+USA}^*} \\
 &\quad + \frac{A_{GA\ 1}^{***}}{BER_{VAR,EU}^{**}} \\
 &= X_{BAR,VAR} + X_{BAR,GA\ 1}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Die beiden Quotienten der Gleichung (10) wurden nach dem Kostenverursachungsprinzip aufgestellt, d.h. die Ausgaben der Untervarianten 1.2 und 2.2 werden nicht nur auf die Anzahl der in Europa refabrizierten Brennelemente, sondern auch auf die in den USA refabrizierten, also auf den gesamten Durchsatz bezogen.

Gleichung (11) zeigt in analoger Form den gesamten spezifischen Barwert der jeweiligen Variante, wobei bei Nichtauftreten einzelner Ausgabenströme der Betrag der entsprechenden Symbole gleich Null gesetzt wird.

Der spezifische Wert lautet:

$$\begin{aligned}
 X_{GES\ ABS,VAR} &= \frac{A_{HE} + A_{ASLA} + A_{WAK} + A_{URLA} + A_{BELA} + A_{USA} + A_{TR} + A_{URZ}}{BER_{ABS,EU + USA}} \\
 &\quad + \frac{A_{GA1}}{BER_{VAR,EU}} = X_{ABS, VAR} + X_{ABS, GA\ 1}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Die Bedeutung der Symbole der Gleichungen (8) bis (11) wurden in dem Abkürzungsverzeichnis am Anfang dieses Berichtes vorgestellt.

3.3.3 Mehrkosten der einzelnen Varianten

Die Mehrkosten der einzelnen Varianten, kurz Pönale, erfassen die Kostendifferenz der verschiedenen Übergangslösungen zu den Brennstoffkreislaufkosten des Gleichgewichtsmarktes. Somit läßt sich die allgemeine Gleichung der gesamten Pönale aus Abschnitt 2.3

$$P_{\text{Ges}} = P_U + P_B \quad (12)$$

durch folgende Einzeldifferenzen ausrechnen; als spezifischer Barwert:

$$P_{\text{Ges, BAR}} = X_{\text{Ges, BAR, VAR}} - X_{\text{Ges, BAR, STAT}}; \quad (13)$$

als spezifischer Absolutwert:

$$P_{\text{Ges, ABS}} = X_{\text{Ges, ABS, VAR}} - X_{\text{Ges, ABS, STAT}}. \quad (14)$$

Für die Pönale der Übergangsphase, also für den Teil der Mehrkosten, der vom Anfall des ersten Brennelementes im Jahre 1982 bis zum Einsatzzeitpunkt T_X der ersten Großanlage anfällt, findet man mit Hilfe der Gleichungen (8) und (9), unter Beachtung des Kostenverursachungsprinzips analog dem spezifischen Wert der Gleichung (13) den Betrag als Barwert:

$$P_{U, \text{BAR}} = (X_{\text{BAR, VAR}} - X_{\text{BAR, STAT}}) \cdot \text{BER}_{\text{VAR, EU + USA}}^* ; \quad (15)$$

als Absolutwert:

$$P_{U, \text{ABS}} = (X_{\text{ABS, VAR}} - X_{\text{ABS, STAT}}) \cdot \text{BER}_{\text{VAR, EU + USA}}. \quad (16)$$

Für den zweiten Teil der Pönale, also die Mehrkosten, die durch unterschiedliche spezifische Wiederaufarbeitungs- und Refabrikationskosten der Großanlage 1 und 2, das heißt also aufgrund verschiedener Auslastungsgrade verursacht werden, findet man in analoger Form den Barwert:

$$P_{B, \text{BAR}} = (X_{\text{BAR, GA 1}} - X_{\text{BAR, GA 2}}) \cdot \text{BER}_{\text{VAR, EU}}^{**} \quad (17)$$

und den Absolutwert:

$$P_{B, \text{ABS}} = (X_{\text{ABS, GA 1}} - X_{\text{ABS, GA 2}}) \cdot \text{BER}_{\text{VAR, EU}} \quad (18)$$

Den Voraussetzungen, aufgeschlüsselt in Abschnitt 3.1, zum alternativen Vergleich der verschiedenen Varianten entsprechend, ist die Gleichung (13) die gesuchte Minimierungsfunktion. Ihr Minimum bedeutet, daß die Mehrkosten der Übergangsphase und der Betriebsphase zusammen einen möglichst geringen Betrag haben sollen. Somit ist dieses Minimum eine volkswirtschaftliche Forderung. Beide Summanden zusammen bilden durch ihr entgegengesetztes Verhalten in der Zeitachse ein stabiles System:

Je kürzer die Übergangsphase, desto geringer die entsprechende Pönale $P_{\ddot{U}}$, desto schlechter aber der Auslastungsgrad einer Großanlage mit hoher Endkapazität, bzw. desto schlechter die Wirkung der Kostendegression bei Großanlagen kleiner Endkapazitäten während der Betriebsphase, somit steigende Pönale P_B . Bei Verlängerung der Übergangsphase und somit bei späterem Einsatzzeitpunkt T_X treten umgekehrte Verhältnisse auf, so daß sich hier, zumindest bei konstanten Endkapazitäten der Großanlage ein echtes Optimum herausbilden kann.

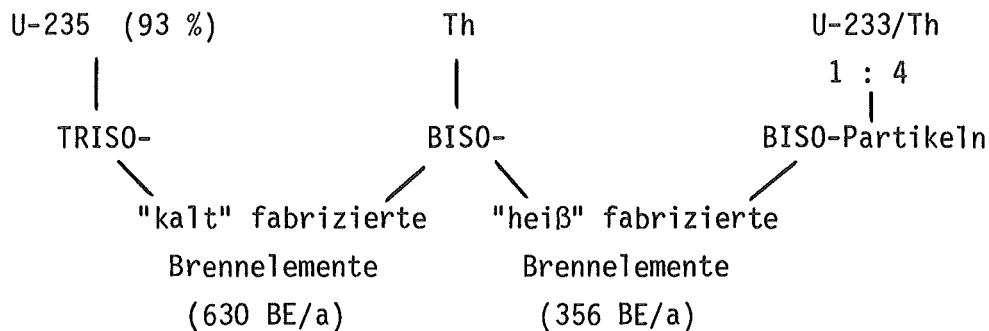
Bei der Ergebnisinterpretation in Abschnitt 6 zeigt eine zweidimensionale Trendanalyse die Reaktion und die Konvergenzkriterien des gesamten Systems bei Durchlaufen der beiden Parameter Einsatzzeitpunkt T_X und Endkapazität der Großanlage EKAP.

4. Technologie des HTR-Brennstoffkreislaufs

4.1 Referenz-Brennelement und -Zyklus

In der Systemanalyse wird der von GULF GENERAL ATOMIC (GGA) für den 1160 MWe-Reaktor beschriebene Referenz-Zyklus zugrunde gelegt [3].

Der geschlossene Brennstoffzyklus wird durch folgendes Schema veranschaulicht (s. Abb. 7):



Danach gibt es drei verschiedene Partikel und zwei verschiedene Brennelemente (BE):

Das "kalt" fabrizierte Brennelement enthält neben Th-Partikeln das frische U-235 mit 93%iger Anreicherung in Form von TRISO-Partikeln. Diese sind mit vier verschiedenen Schichten umhüllt: Puffer-, innerer isotroper pyrolytischer Kohlenstoff (PyC), Siliciumcarbid (SiC) und äußerer isotroper PyC. Das "heiß" fabrizierte Brennelement enthält das erbrütete U-233, das mit Thorium im Verhältnis 1 : 4 verdünnt ist (bezogen auf Gesamturan).

Darüberhinaus enthält es wie der frische Block reine Thorium-Partikeln. Beide Partikelarten sind BISO-beschichtet, d.h. die Beschichtung besteht aus der inneren Puffer- und der äußeren isotropen PyC-Schicht. Die Schwermetallbilanz des beschriebenen Brennstoffkreislaufs ist in der Tabelle 1 aufgeführt [3].

4.2 Einzelbeiträge zur technischen Projektierung und Kostenberechnung

4.2.1 Transport

Es wurden drei Transportbehälter entworfen und ihre Kosten für die Transporte von drei verschiedenen Formen des Kernbrennstoffes kalkuliert, und zwar:

- abgebrannte Brennelemente
- Brennstofffätsche
- U-233-Nitratlösung.

	Schwermetallmenge (kg/a)	
	Kreislauf ohne Wiederaufarbeitung	Kreislauf mit Wiederaufarbeitung
<hr/>		
EINGANG		
Brutpartikeln		
Th-232	8080	8080
U-233	-	200
Abbrandpartikeln		
U-235	670	390
<hr/>		
AUSGANG		
Brutpartikeln		
Th-232	7470	7490
U-233	190	200
Abbrandpartikeln		
U-235	40	30
Pu-239	1,0	0,6

Tab. 1: Schwermetall-Stoffbilanz eines 1160 MWe-Cores
im Gleichgewicht (Lastfaktor 0,8)
nach Angaben des Gulf General Atomic [3]

Die Transporttechnik und Kostenkalkulation ist von der TRANSNUKLEAR GmbH in einem gesonderten Bericht ausführlich beschrieben worden|4|. Die Eingabedaten in Form von Preisen sind in den Abbildungen A1 - A3 im Anhang wiedergegeben. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Kosten für den Schienentransport innerhalb Europas:

	TDM / VE
abgebrannte BE	1.800
Brennstoffasche (feed und breed)	380
U-233-Nitrat	110

Tab. 2: Kosten für innereuropäischen Transport im voll entwickelten HTR-Markt (Entfernung 300 km)

4.2.2 Lagerung von Kernbrennstoffen

Bei der Optimierung der Großanlage und der Übergangslösungen spielen die Lagerkosten eine entscheidende Rolle. Zur Ermittlung dieser Kosten wurden verschiedene Lagertypen für die unterschiedlich anfallende Form des Kernbrennstoffs technisch projektiert.

Für jeden einzelnen Fall wurden die Investitionen sowie die fixen und variablen Betriebskosten in Abhängigkeit von der Kapazität ermittelt. Die Kostenkurven sind im Anhang in den Abbildungen A4 - A6 wiedergegeben. Danach betragen die jeweiligen Investitionen der Lager für ein Fassungsvermögen von 14 VE:

- Brennelement-Zwischenlager	18 Mio DM
- Aschelager (feed und breed)	14 Mio DM
- U-233-Lager	11 Mio DM

Näheres über das Brennelement-Zwischenlager ist in einem Bericht der HRB|5| und über die übrigen Lager in einem Bericht |6| von KFA und NUKEM zu finden.

4.2.3 Head-End-Zelle

Die Projektierung des Head-End ist von KFA und NUKEM in einem Bericht niedergelegt worden [7]. Den Autoren stand ferner der Entwurf einer kleineren Anlage für Kugelelemente zur Verfügung [8]. Die für diese Anlage abgeschätzten Investitionen ergeben zusammen mit den Daten, die die GGA für eine Großanlage ermittelt hat [1], ein in sich konsistentes Bild, das in der Abbildung A7 des Anhangs dargestellt ist. Danach beträgt die Investitionssumme einer Head-End-Zelle für ca. 5000 MWe (4 VE/a) ca. 70 Mio DM. Die Betriebskosten belaufen sich auf ca. 6 Mio DM/a. Die Degression der Anlageninvestition läßt sich durch einen Degressionsexponenten* darstellen [10], der in Übereinstimmung mit den Erfahrungswerten aus der Heißen Chemie zu 0,44 bestimmt wurde [11].

Die Zelle enthält zwei Verbrennungslinien, die je aus einem Wirbelschicht- oder Schachtofen zur Verbrennung des Matrixgraphits und einer nachgeschalteten Stufe zur PyC-Verbrennung bestehen.

4.2.4 W A K

Die Möglichkeiten des Einsatzes der WAK für die Aufarbeitung von thoriumhaltigen Kernbrennstoffen hat NUKEM gemeinsam mit der Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH (GWK) geprüft [2]. Man kann sagen, daß die WAK nach entsprechender Umrüstung zwei, aus technischen Gründen aber höchstens vier Reaktoren mit je 1160 MWe-Leistung bedienen kann. Die Umrüstungskosten für zwei Reaktoren wurden zu ca. 15 Mio DM abgeschätzt (ohne Head-End). Bei Erweiterung auf mehr als zwei Reaktoren sind zusätzliche Kosten in Höhe von weiteren 18 Mio DM wegen Engpässen bei der Waste-Verarbeitung zu erwarten.

* Definition:

$$I_2/I_1 = (K_2/K_1)^x$$

(I_2/I_1 = Investitions-, K_2/K_1 = Kapazitätsverhältnis,

x = Degressionsexponent)

Die Betriebskosten der WAK dürften 21 bis 26 Mio DM/a betragen, je nach Auslastungsgrad der Anlage.

Die Höhe der Investitionen für die Umrüstung der WAK und ihre Betriebskosten sind in der Abbildung A8 des Anhangs dargestellt worden. Die Kurven enthalten nicht die Kosten für das Head-End.

4.2.5 Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation

Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich, die Höhe der Investitionen der Großanlage zu ermitteln. Allerdings hatte die NUKEM Zugang zu einigen vertraulichen Ergebnissen der GGA (12, 13). Diese Daten wurden mit der Dollarparität von 3,2 in DM umgerechnet: die Umrechnung der Investitionen auf kleinere Anlagen geschah mit dem von GGA abgeschätzten Degressionsexponenten von 0,47. Die angegebenen Kosten für Wiederaufarbeitung und fernbediente Refabrikation sind nur für eine integrierte Anlage gültig, in der beide Prozesse in ein und demselben Zellengebäude untergebracht sind. Aus den in der Abbildung A9 des Anhangs dargestellten Kostenkurven geht hervor, daß die Investitionen für eine 40.000 MWe-Großanlage mit ca. 560 Mio DM angesetzt werden müssen. Die Betriebskosten wurden zu ca. 85 Mio DM/a abgeschätzt. Die Fehlerbreite dieser Angaben beim gegenwärtigen Stand der Technik ist relativ groß.

5. Kaufmännische Randbedingungen

Für die Investitionsrechnung wurde die DCF-Methode angewendet, wobei für die Großanlage und die Übergangslösungen folgende Annahmen zugrunde gelegt wurden:

- Preisstand per 1.7.1972
- Dollarparität 3,2 entsprechend dem Stand vom 1.7.1972
- Als Bauzeit für die Einzelanlagen wurden folgende Annahmen getroffen:

	Jahre
Großanlage	5
Head-End	4
Umbau WAK	3
Zwischenlager	
1. Einheit	4
alle weiteren Einheiten	3
Aschelager	3
U-233-Lager	2

Es wurde unterstellt, daß sich die Investitionen über der angegebenen Bauzeit wie folgt verteilen:

Bauzeit (dimensionslos)	Bruchteil der Gesamtsumme investiert
0,2	0,05
0,4	0,15
0,6	0,65
0,8	0,95
1,0	1,00

- Die Großanlage hat eine Anfahrphase von 2 Jahren nach Betriebsbeginn. In dieser Zeit kann sie

im 1. Jahr bis zu	50 %
im 2. Jahr bis zu	75 %

ihrer normalen Kapazität genutzt werden.

- Das betriebsnotwendige Umlaufvermögen in der Großanlage wurde mit ca. 10 % der jährlichen Betriebskosten angenommen.
- F & E-Kosten sowie Lizenzgebühren wurden nicht berücksichtigt.
- Für die Berechnung der Uranzinsen wurde das erbrütete Uran mit 8,2 Mio DM/VE bewertet.

- Die Durchlaufzeit des Urans durch eine betriebsbereite Großanlage wurde mit 1 a angenommen.
- Die Kosten für die Endlagerung des Waste sind nicht berücksichtigt worden.
- Bei der Großanlage wurden folgende Annahmen für die ertragsunabhängigen Steuern getroffen:

Vermögenssteuer	1	%
Gewerbekapitalsteuer	0,6	%
Lohnsummensteuer	2	%

- Die Großanlage wurde steuerlich in 12 a linear abgeschrieben.
- Die Einnahmen- und Ausgabenströme der Großanlage wurden auf den 1.1.1982 mit einer DCF-Rate von 20 % vor Steuern diskontiert. Die Nutzungsdauer der Großanlage beträgt 12 a. Die Transportausgaben und der Uranzins wurden mit 8 %, die Lagerkosten mit 20 % diskontiert.
- Im Bereich der Übergangslösungen wurde generell mit 8 % auf den 1.1.1982 diskontiert.
- Einnahmen aus Veräußerung von Vermögensteilen (z.B. Grundstücke, Maschinen etc.) am Ende der Nutzungsdauer wurden ebenso wie eventuell notwendig werdende Ausgaben für den Abbruch von Anlagen nicht berücksichtigt.
- Die Kosten für die Wiederaufarbeitung und Refabrikation in den USA betragen entsprechend dem Stand der Kenntnis per 1.7.1972 4,8 Mio DM/VE (ohne ThO₂-Partikeln und Graphitblock).

Die Anlagenkosten und laufenden fixen und variablen Betriebskosten der Wiederaufarbeitungsanlage, Head-End-Zelle, Großanlage, Uranlager, Aschelager, BE-Lager sowie alle Transportkosten werden als normierte Gleichungen eingegeben. Die Abszisse stellt die Auslastung in VE dar, die Ordinate die Kosten in Mio DM/VE. Die graphische Darstellung dieser Kurven siehe Anhang.

Der Ankauf von Graphit und neuem Uran wurde nicht erfaßt; somit sind die errechneten Brennstoffkreislaufkosten nur Aufwendungen für Dienstleistungen.

6. Darstellung der Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse wird hier das Verhalten des Modells auf verschiedene Marktprognosen tabellarisch vorgestellt, wobei am Beispiel des Gleichgewichtsmarktes der Einfluß der einzelnen Ausgabenströme unter extremen Annahmen der Parameter "Kapazität der Großanlage" und ihr "Einsatzzeitpunkt" auf die gesamten Brennstoffkreislaufkosten gezeigt wird. Der Parameter Einsatzzeitpunkt der Großanlage bestimmt auch direkt die Lagerzeit der Brennelemente.

6.1 Trendanalyse der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt

Die Minimierungsfunktion, Gleichung (13), die diesem Simulationsmodell zugrunde liegt, beinhaltet, daß durch die Anzahl der refabrizierten Brennelemente festgelegt ist, auf wieviel Reaktoren die Brennstoffkreislaufkosten umgeschlagen werden dürfen. Die gesuchten spezifischen Zykluskosten werden zum einen in Matrizenform, zum anderen in dreidimensionalen Computerzeichnungen als Funktion der Kapazität EKAP der Großanlage und ihres Einsatzzeitpunktes T_X von dem Simulationsmodell erstellt. Diese beiden Darstellungsarten werden für jeden dieses Modells beeinflussenden Kostenstrom getrennt ausgeführt.

Die Frage, ob sich für das gesamte System ein echtes, zweidimensionales Optimum einstellen kann, wird nur durch eine, für jeden Kostenstrom getrennt durchgeführte Konvergenzbetrachtung beantwortet, wobei diese Untersuchung für jede der drei Marktprognosen gilt.

1. Trendanalyse des Uranzinses

Je größer die Kapazität der Großanlage und je früher sie eingesetzt wird, desto kürzer die Lagerzeit und somit desto geringer die durch die Verweilzeit des Urans im äußeren Brennstoffkreis hervorgerufenen Kapitalbildungskosten, kurz Uranzins. Der Uranzins konvergiert bei der kürzesten Durchlaufzeit, die dem System gegeben wird, nämlich 1 Jahr, zu dem spezifischen Wert 8 % von 8,2 Mio DM/VE; das Minimum liegt bei großer Kapazität und frühem Einsatzzeitpunkt (Abb. 8a).

2. Trendanalyse der Lagerkosten

Die Lagerkosten zeigen ein paralleles Verhalten wie der Uranzins, wobei ihr minimalster Wert durch den break-even-point der Großanlage bestimmt wird, d.h. die Großanlage wird dann in Betrieb genommen, wenn die Anzahl der gelagerten Brennelemente eine Mindestauslastung der Großanlage, also einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Auslastungsgrad, garantieren. Dieser Wert kann vorgegeben werden. Im beschriebenen Modell wird diese

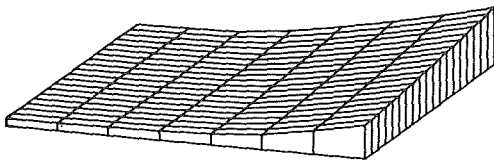
Mindestauslastung als Prozentsatz der Kapazität der Großanlage festgesetzt. Wird dieser Prozentsatz gleich Null gesetzt, bedeutet das, daß die Großanlage bei Anfall des ersten Brennelementes schon in Betrieb genommen wird, die spezifischen Lagerkosten gehen bei einem frühen Einsatzzeitpunkt und großer Kapazität gegen Null (Abb. 8b).

3. Trendanalyse der Transportkosten

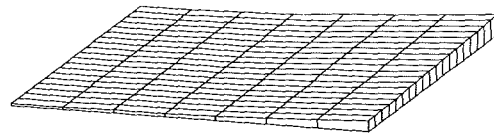
Die Transportkosten beinhalten den Transport der abgebrannten Brennelemente vom Reaktor zum Brennelementlager und den Transport der refabrizierten Brennelemente von der Wiederaufarbeitungsanlage zum Reaktor, wobei im Regelfall der Transport ins Brennelementlager 1,8 Mio DM/VE, der Rücktransport, es werden hierzu die gleichen Behälter benutzt, nur 0,07 Mio DM/VE kostet. Wird nun eine kleine Großanlage so spät eingesetzt, daß das Brennelementlager während ihrer gesamten Betriebsphase nicht ganz abgebaut werden kann, muß der hohe Transportkostenanteil der im Lager verweilenden, nicht refabrizierten Brennelemente auf die kleinere Anzahl der refabrizierten Brennelemente umgeschlagen werden, sozusagen als Pönale verursacht durch eine unterdimensionale Großanlage. Die spezifischen Transportkosten wachsen also entsprechend der Anzahl der im Lager verbleibenden Brennelemente. In allen realistischen Fällen, d.h. Brennelementlagerabbau während den ersten Betriebsjahren der Großanlage, setzen sich die spezifischen Transportkosten aus den beiden fast konstanten Summanden Transport der abgebrannten und Transport der refabrizierten Brennelemente zusammen. Dieser Wert liegt ab genügend großer Kapazität der GA und ab nicht zu spätem Einsatzzeitpunkt bei 1.86 Mio DM/VE (Abb 8c).

4. Trendanalyse der Wiederaufarbeitungs- und Refabrikationskosten

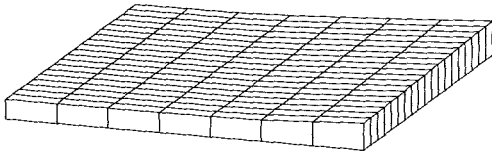
- a) Bei konstanter Kapazität ist für zu frühen Einsatzzeitpunkt T_X die Großanlage nicht ausgelastet, mit wachsendem T_X erreicht die Großanlage ihren maximalen Auslastungsgrad PHI_{\max} , der spezifische Wert der Großanlage bleibt dann konstant.
- b) Für konstanten Einsatzzeitpunkt unterliegt die Entwicklung des spezifischen Wertes so lange der Kostendegression, bis dieser Effekt durch Überdimensionierung der Großanlage kompensiert wird.



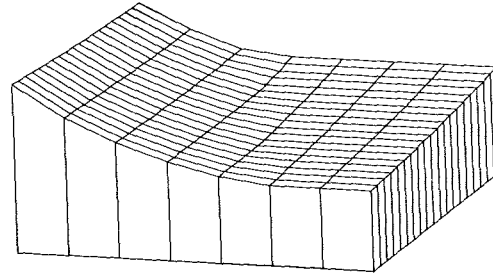
- a) X-Achse=Kapazität der GA
Y-Achse=Einsatzzeit der GA
Z-Achse=Uranzins



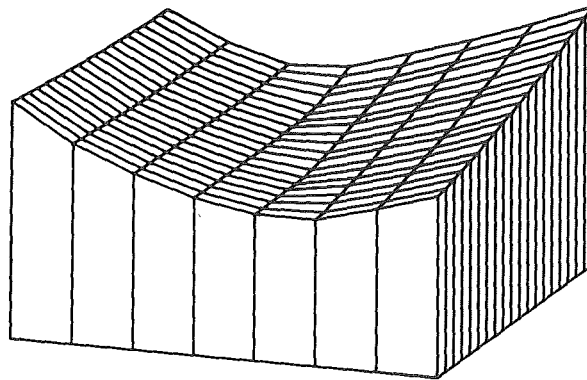
- b) X-Achse=Kapazität der GA
Y-Achse=Einsatzzeit der GA
Z-Achse=spez. Lagerkosten



- c) X-Achse=Kapazität der GA
Y-Achse=Einsatzzeit der GA
Z-Achse=spez. Transportkosten



- d) X-Achse=Kapazität der GA
Y-Achse=Einsatzzeit der GA
Z-Achse=spez. Kosten der Großanlage



- e) X-Achse=Kapazität der GA, Y-Achse=Einsatzzeit, Z-Achse=spez. Gesamtwert

Abb. 8:

Trendanalyse der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt, Computerzeichnungen der entspr. Matrizen

Die Überlegungen a) und b) bewirken im Zusammenspiel, daß mit wachsendem Einsatzzeitpunkt die Kompensation Kostendegression-Überdimensionierung bei immer größeren Kapazitäten und folglich immer niedrigeren spezifischen Kosten geschieht (Abb 8d).

Zusammenfassend liefert das System nur ein scheinbares Optimum in einer Spalte " $T_X = \text{constant}$ ", bzw. in einer Zeile " $EKAP = \text{constant}$ "; zweidimensional unterliegt das System dem Zwang zu sehr großen Kapazitäten bei möglichst späten Einsatzzeitpunkten (Abb. 8e).

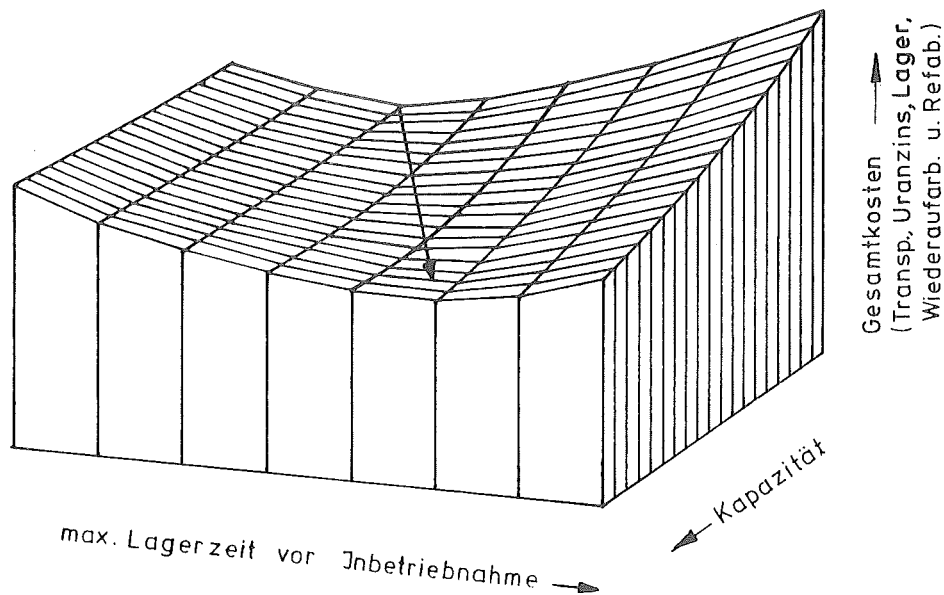
6.2 Ergebnisse der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt

Wie man aus der Optimierungsmatrix, die auch gleichzeitig die Entscheidungsmatrix des gesamten Systems (Abb. 8e, 9a und Tab. 5) ist, ersehen kann, wird die Differenz der spezifischen Werte der Zeilen-, bzw. Spaltenoptima mit fortlaufender Indizierung dieser Matrix ERG (EKAP, TX) immer kleiner, wogegen die absoluten Beträge des gesamten Brennstoffkreislaufs durch die Verlängerung der Lagerzeit, verursacht durch einen späteren Einsatzzeitpunkt T_X der Großanlage, steigen. Dieses gegensätzliche Verhalten bewirkt, daß die volkswirtschaftliche Bedingung "vertretbarer Gesamtaufwand" dem betriebswirtschaftlichen Streben zu minimalen spezifischen Kosten die Grenzen setzt, zumal, wie aus Abschnitt 6.1 hervorging, das System keine Konvergenz kennt.

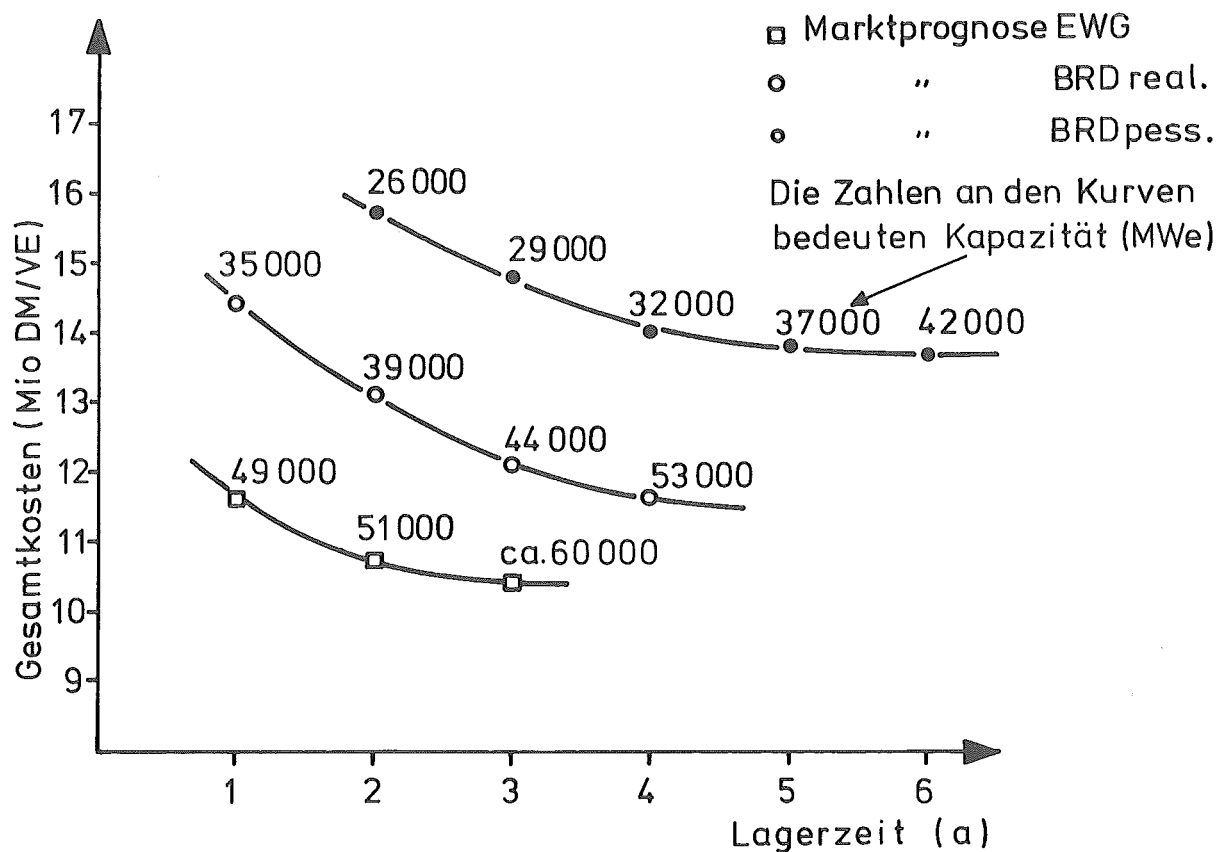
Es stellt sich hier die Frage, ob nicht gleich die absoluten Beträge als Grundlage der Minimierungsfunktion dem System hätten mitgeteilt werden können. Ein so aufgestelltes Simulationsmodell wäre bei freiem Spiel dem Systemzwang "kein äußerer Brennstoffkreislauf" folgend - im Extremfall "kein Reaktor" - an der Aufgabenstellung vorbeigelaufen, auch bei formal logischen Endergebnissen, nämlich absolute Beträge gegen Null. Die in Abschnitt 3 aufgeworfenen Restriktionen der Investitionsrechnung wurden bei diesem Exkurs bewußt nicht beachtet.

Die Ergebnistabelle 5, numerisch erfaßt durch Gleichung (8), zeigt, daß es ein absolutes Kostenminimum, bedingt durch die beiden Parameter Kapazität und Lagerzeit, im hier betrachteten Kapazitätsbereich nicht gibt. Die Kosten sind dann minimal, wenn die größtmögliche Anlage gebaut und soviel Brennelemente durch Lagerung angesammelt werden, daß diese Anlage bei Inbetriebnahme so hoch wie technisch möglich ausgelastet werden kann. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 9a in Form eines Raumdigramms für die europäische Marktprognose dargestellt. Folgt man dem darin gezeichneten Pfeil in Richtung minimaler Kosten, erreicht man den Kapazitätsbereich der Großanlage, bei dem die Kostendegression keine deutliche Verringerung der gesamten Kreislaufkosten mehr bringt. Diese Aussage gilt für alle drei im Kap. 2 vorgestellten Marktprognosen, wie die Kurvenschar der Abb. 9b zeigt.

Zusammenfassend findet man als ausgewogene Lösung für die europäische Marktprognose die Großanlage GA 2 mit einer Kapazität von 44 VE, was einer installierten Leistung von etwa 50.000 MWe entspricht, bei einer Lagerzeit von 2 Jahren, also T_X gleich 1994. Außerdem ist zur Zeit ungesichert, wie groß Wiederaufarbeitungsanlagen maximal gebaut werden können, ohne daß erhebliche Sprungkosten den Effekt der Kostendegression, aufgezeigt in Abb. A9 im Anhang,



a) Computerzeichnung der Tab. 5



b) Gesamtkosten bei vorgegebener Lagerzeit

Abb. 9: Optimierung der Großanlage zur Wiederaufarbeitung und Refabrikation

überlagern. Die oben ermittelte Kapazität fällt noch nicht unter diese Restruktion. Der Auslastungsgrad PHI der GA 2 ist in keiner der ausgewählten optimalen EKAP-TX-Kombinationen der verschiedenen Marktprognosen, wie sie Tabelle 3 vorstellt, gleich eins, d.h. daß die Minimierung der gesamten volkswirtschaftlichen Ausgaben durch Vorziehen vor T_X und somit Verkürzung der Lagerzeit auf Kosten des Auslastungsgrades PHI, für die europäische Marktprognose in Tab. 6 geprintet, geht.

Marktprog- nose (Abb.1)	Zubauraten (MWe/a)	Kapazität (MWe)	max. Lagerzeit vor Inbetriebnahme	Gesamtkosten (Mio DM/VE)	Auslastungs- grad der GA 2
1.EWG real.	7.000	50.000	2	11	95,8 %
2.BRD real.	4.600	45.000	3	12	94 %
3.BRD pess.	2.300	33.000	4	14	92,6 %

Tab. 3: Kapazität, Lagerzeit und Brennstoffkreislaufkosten
bei voll entwickeltem Markt in Abhängigkeit von den
verschiedenen Marktprognosen

Im Gegensatz zu der Marktprognose, die das Optimum von Lagerzeit und Kapazität der GA verschiebt, beeinflußt der Parameter DCF-Rate nur den Betrag des spez. Wertes und die Kapitalrückflußzeit - pay out period - der Großanlage (Abb. 6 u. 10)

Aufgeschlüsselt haben die einzelnen Kostenströme den in Tabelle 4 dargestellten Anteil vom gesamten Wert; Diese Aufteilung verschiebt sich natürlich bei Änderung der EKAP- T_X -Kombination, wie die einzelnen, in Abschnitt 6.1
sprochenen Raumdigramme beweisen.

Marktprog- nose	Transport	Uranzins	Lagerung	Wiederauf- arbeitung	Refabrikation
1.EWG real.	1,86	0,81	0,37	4,85	2,90
2.BRD real.	1,85	0,88	0,55	5,50	3,30
3.BRD pess.	1,94	1,06	0,85	5,77	4,40

Tab. 4: Aufschlüsselung in Mio DM/VE der in Tabelle 3 angegebenen
Brennstoffkreislaufkosten (Wiederaufarbeitung incl. Head End
sowie Waste-Verfestigung und -Transport, Refabrikation ohne
ThO₂-Partikeln und Graphit)

ENTSCHEIDUNGSMATRIX : SUMME DER SPEZ. WERTE , TR UND UR 0.08 , BELA UND GA

BEI	0.20	ABDISKONTIERUNG						
TXSOLL	1992.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
EKAP								
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
34. 11.734860	11.734860	11.734860	12.463450	14.091350	15.210420	17.705510	20.019340	22.484930
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
35. 11.702030	11.702030	11.702030	12.267980	13.873170	15.667440	17.582060	19.723670	22.182110
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
36. 11.640790	11.640790	11.640790	12.004610	13.444900	15.343820	17.226470	19.322660	21.749140
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
37. 11.643030	11.643030	11.643030	11.874730	13.301160	15.179240	17.043940	19.130380	21.523660
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
38. 11.632600	11.632600	11.632600	11.616510	13.018510	14.861310	16.694150	18.745170	21.097160
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
39. 11.632330	11.632330	11.632330	11.440260	12.824610	14.642070	16.452250	18.478160	20.800870
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
40. 11.620820	11.620820	11.620820	11.205780	12.568310	14.353630	16.013250	18.129340	20.414850
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
41. 11.619310	11.619310	11.619310	11.100360	12.451890	14.220760	15.987980	17.966290	20.233380
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
42. 11.605930	11.605930	11.605930	10.854420	12.215430	13.838610	15.579770	17.645430	19.978520
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
43. 11.622450	11.622450	11.622450	10.837060	12.039570	13.641150	15.361370	17.401240	19.701780
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
44. 11.627060	11.627060	11.627060	10.797060	11.907100	13.384200	15.078180	17.086050	19.350520
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
45. 11.641590	11.641590	11.641590	10.785900	11.806620	13.259990	14.940170	16.931040	19.176390
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
46. 11.644480	11.644480	11.644480	10.764780	11.491870	13.021760	14.677810	16.639150	18.851280
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
47. 11.657200	11.657200	11.657200	10.759040	11.332250	12.854960	14.493490	16.433410	18.621330
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
48. 11.658540	11.658540	11.658540	10.737370	11.134110	12.635290	14.331310	16.164550	18.322000
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
49. 11.695380	11.695380	11.695380	10.751950	11.020350	12.517340	14.198740	16.016980	18.156280
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
50. 11.694370	11.694370	11.694370	10.743910	10.932940	12.299230	13.956410	15.749340	17.858150
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
51. 11.719470	11.719470	11.719470	10.750220	10.693620	12.143700	13.782840	15.557060	17.643280
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
52. 11.743690	11.743690	11.743690	10.741250	10.511310	11.941380	13.558150	15.309020	17.367090
TXIST 1993.	1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
53. 11.767080	11.767080	11.767080	10.753430	10.421930	11.840850	13.445290	15.183490	17.226270

Tabelle 5: Spez. Barwert der Gesamtkosten im Gleichgewichtsmarkt (Marktprognose 1)

AUSLASTUNGSGRAD DER GROSSANLAGE								
TXSOLL	1992.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.
EKAP								
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
34. 0.946403	0.946403	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
35. 0.939680	0.939680	0.998093	0.998093	0.998093	0.998093	0.998093	0.998093	0.998093
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
36. 0.933331	0.933331	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
37. 0.924923	0.924923	0.996994	0.996994	0.996994	0.996994	0.996994	0.996994	0.996994
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
38. 0.916957	0.916957	0.998828	0.998828	0.998828	0.998828	0.998828	0.998828	0.998828
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
39. 0.909399	0.909399	0.998288	0.998288	0.998288	0.998288	0.998288	0.998288	0.998288
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
40. 0.902220	0.902220	0.991108	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
41. 0.895391	0.895391	0.984279	0.997287	0.997287	0.997287	0.997287	0.997287	0.997287
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
42. 0.888887	0.888887	0.977775	0.998939	0.998939	0.998939	0.998939	0.998939	0.998939
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
43. 0.880618	0.880618	0.969507	0.998447	0.998447	0.998447	0.998447	0.998447	0.998447
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
44. 0.872725	0.872725	0.961614	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
45. 0.865183	0.865183	0.954071	0.997528	0.997528	0.997528	0.997528	0.997528	0.997528
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
46. 0.857969	0.857969	0.946857	0.999030	0.999030	0.999030	0.999030	0.999030	0.999030
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
47. 0.851061	0.851061	0.939950	0.998579	0.998579	0.998579	0.998579	0.998579	0.998579
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
48. 0.844442	0.844442	0.933331	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
49. 0.836279	0.836279	0.925167	0.997730	0.997730	0.997730	0.997730	0.997730	0.997730
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
50. 0.828442	0.828442	0.917331	0.999108	0.999108	0.999108	0.999108	0.999108	0.999108
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
51. 0.820913	0.820913	0.909801	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690	0.998690
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
52. 0.813673	0.813673	0.902542	0.991450	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997	0.999997
TXIST 1993.	1993.	1994.	1995.	1996.	1997.	1998.	1999.	
53. 0.806707	0.806707	0.895595	0.984483	0.997901	0.997901	0.997901	0.997901	0.997901

Tabelle 6: Auslastungsgrad PHI der Großanlage im Gleichgewichtsmarkt (Marktprognose 1)

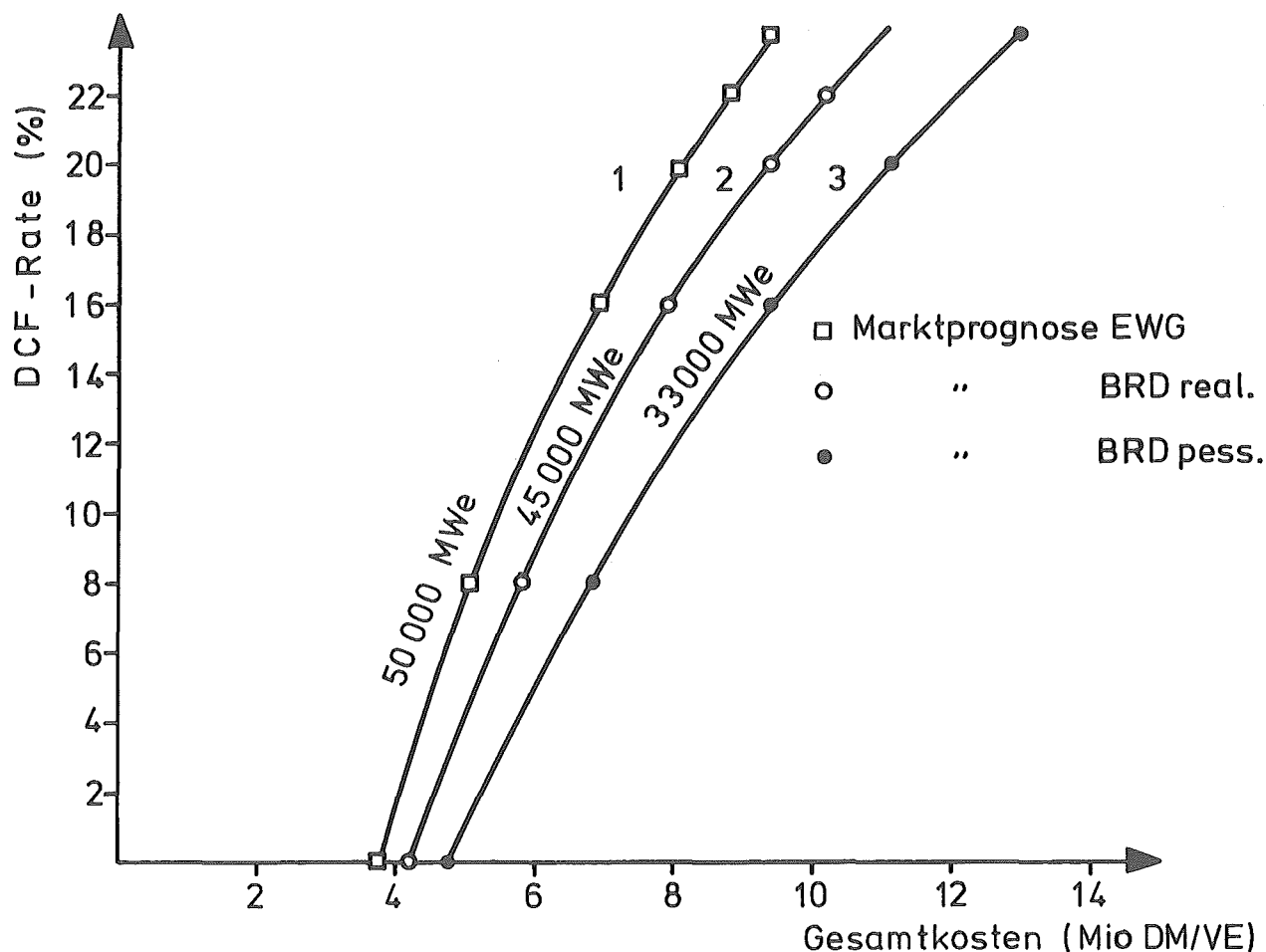


Abb. 10: Abhängigkeit der DCF-Rate von den spez. Gesamtkosten der Großanlage

Geht man davon aus, daß der HTR bis 1990 ungefähr 20 % der gesamten installierten Reaktorleistung ausmacht und außerdem zur Schließung des äußeren Brennstoffkreislaufs eine europäische Lösung angestrebt wird, betragen die gesamten spezifischen Kosten 11 Mio DM/VE. Dieser Lösung liegt eine Lagerzeit der angefallenen Brennelemente von 2 Jahren vor Einsatz der Großanlage GA 2 zugrunde, wobei das Brennelementlager am Ort dieser GA 2 gebaut wird. Die Großanlage wird stufenweise in den ersten zwei Jahren ihrer Betriebsphase das Lager so abbauen, daß sie zusammen mit den laut Marktpgnose 1 in Abb. 1 neu anfallenden Brennelementen und unter Beachtung der maximal zulässigen Auslastung während der Anlaufphase im Schnitt mit 96 Prozent ausgelastet ist. Der gemittelte Jahresdurchsatz beträgt 350 t Schwermetall.

Treten die erwarteten HTR-Zubauraten nicht ein oder aber wird eine nationale Lösung zur Schließung des Kreislaufs angestrebt, verteuern sich die gesamten Brennstoffkreislaufkosten entsprechend dem in Tab. 3 dargestellten Trend.

6.3 Optimierung der Übergangslösung

Eine der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt analoge Trendanalyse ist hier nicht nötig, da das gleiche "Kräftespiel" nur bei Erweiterung der Anzahl der Kostenströme zu einem ebenfalls, unter Beachtung des obigen volkswirtschaftlichen Entscheidungskriteriums, betriebswirtschaftlichen Endzustand des gesamten Systems führt. Auch hier gibt es bei Durchlaufen des Parameters Einsatzzeit T_X der Großanlage ceteris paribus ein echtes Minimum.

Am Beispiel der Variante WAK soll eine Ergebnisdarstellung vorgenommen werden. Ein Vergleich der absoluten Ausgabenreihen der Tab. 7 mit der Dauer ihres zeitlichen Anfalls im Balkendiagramm (Abb. 11) der Variante 2.1 - europäische Übergangslösung - zeigt den Parallelbetrieb der Head-End-Zelle und der Wiederaufarbeitungsanlage von 1982 bis zum Einsatz der Großanlage 1989. Das Uranylinitrat als Output der WAK wird im Uranlager gespeichert, die Transportkosten der anfallenden Brennelemente, der Uranasche und des Uranylinitrats werden im Kostenstrom "Transport" aufaddiert. Ab dem Jahre 1985 - siehe Tab. 7 - sind die HE-Zelle und auch die WAK unterdimensioniert, der anfallende Brennelementüberschuß wird im Brennelementlager aufgefangen und später nach Abbau des Uranlagers im Jahr 1990 stufenweise verarbeitet.

Die Großanlage unterscheidet bei ihren variablen Kosten die unterschiedlichen Input-Ströme, wobei der Abbau des Uranlagers die höchste Priorität hat. Insgesamt werden in dem hier besprochenen Fall 453 Brennelemente refabriziert. Mit Hilfe der Gleichungen 14 bis 18 wurden die Pönale berechnet. Danach beträgt der Wert für $P_{0, \text{BAR}}$ 346 Mio DM, die Differenz der spez. Absolutwerte der zu vergleichenden Großanlagen GA 2 und GA 1 von 0,30 Mio DM/VE multipliziert mit dem Durchsatz BER_{EU}^{***} ergibt den Barwert der Pönale während der Betriebsphase

$$P_{B, \text{BAR}} = 0,3 \text{ Mio DM/VE} \cdot 43 \text{ VE} = 13 \text{ Mio DM/VE}$$

Mit diesem Betrag $P_{B, \text{BAR}}$ als Pönale muß eine Wiederaufarbeitungsindustrie kalkulieren, wenn sie 1982 eine alternative Entscheidung über Einsatzzeit und Kapazität der GA 1 treffen will. Eine Entscheidung innerhalb des Programms wurde mit dem spez. Barwert gefällt.

Bei positiver Differenz (GA 1 - GA 2), hervorgerufen durch einen höheren Auslastungsgrad PHI der GA 2 als der Auslastungsgrad der GA 1 - hier 96 % und 94 % - ist somit die Gesamtpönale größer als die Pönale P_0 - der Übergangsphase. Bei spätem Einsatzzeitpunkt T der Großanlage GA 1 kann der Auslastungsgrad größer dem der Großanlage GA 2 des Gleichgewichtsmarktes sein, die Differenz (GA 1 - GA 2) wird negativ und die Gesamtpönale wird zu Lasten des Erlöses der Großanlage kleiner als die Pönale P_0 .

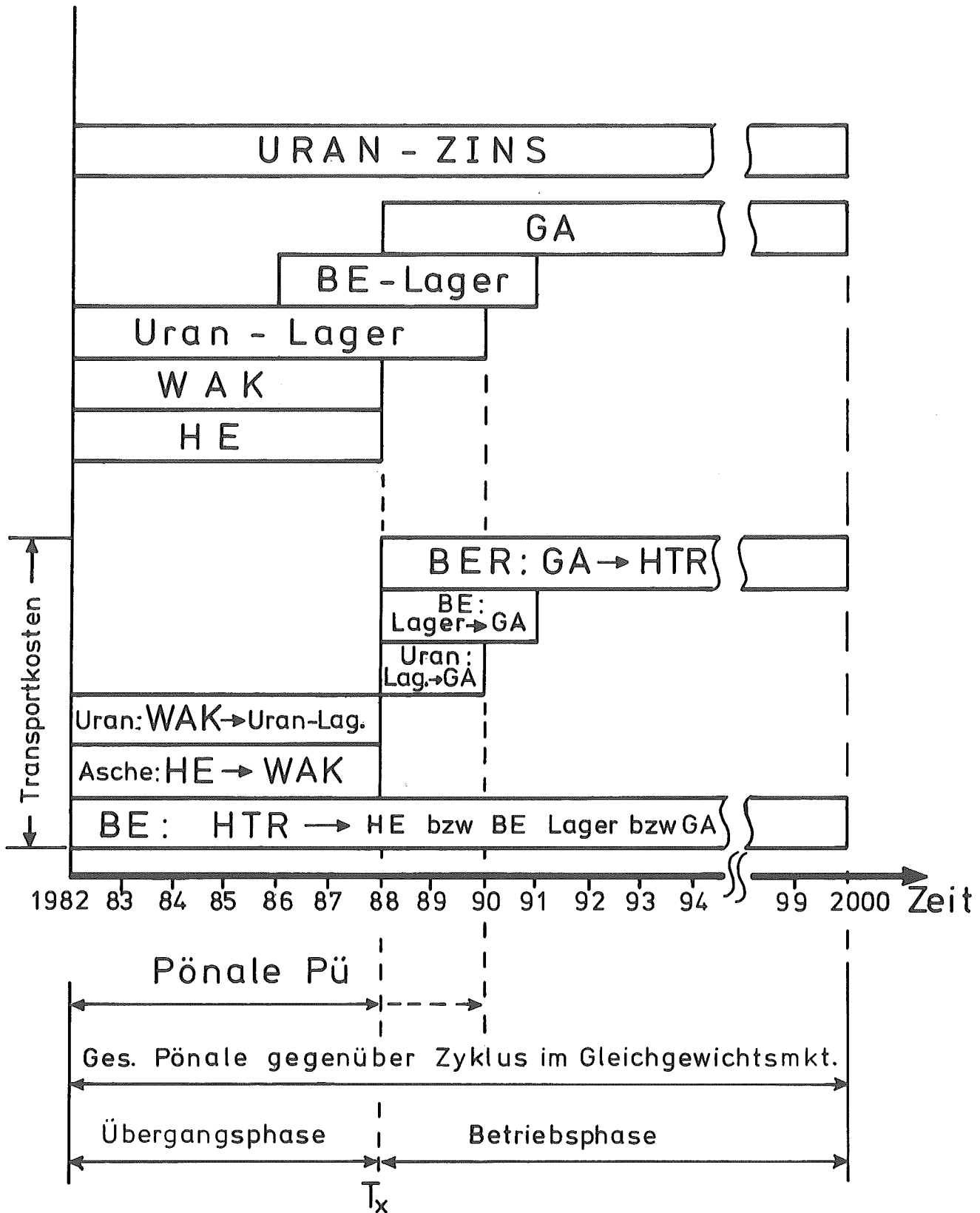


Abb. 11: Balkendiagramm der Variante 2.1

ABSOLUTE AUSGABENREIHEN						
2	3	4	1989	0.4200000E 02		
HE	ASCHELAGER	WAK	URANLAGER	USA-LOESUNG	BER-USA	
1	0.5697118E 02	0.0000000E 00	0.3319998E 02	0.1306867E 02	0.0000000E 00	0.0000000E 00
2	0.6353976E 01	0.0000000E 00	0.2223715E 02	0.4277312E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
3	0.6431477E 01	0.0000000E 00	0.2423717E 02	0.4319347E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
4	0.6508976E 01	0.0000000E 00	0.2563716E 02	0.4382398E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
5	0.6586476E 01	0.0000000E 00	0.2703717E 02	0.4466465E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
6	0.6586476E 01	0.0000000E 00	0.2703717E 02	0.4550523E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
7	0.6586476E 01	0.0000000E 00	0.2703717E 02	0.4634601E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
8	0.6586476E 01	0.0000000E 00	0.2703717E 02	0.4718670E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
9	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.4277312E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
10	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.4256296E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
11	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
12	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
13	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
14	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
15	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
16	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
17	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
18	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
19	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
20	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
SUMME DER ABS-WERTE						
21	0.1026115E 03	0.0000000E 00	0.2134601E 03	0.1705693E 02	0.0000000E 00	0.0000000E 00
SPEZIFISCHE ABS-WERTE						
21	0.2265160E 00	0.0000000E 00	0.4712157E 00	0.3765337E-01	0.0000000E 00	
SPEZIFISCHE BARWERTE						
21	0.7028655E 00	0.0000000E 00	0.1046911E 01	0.1009971E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
TRANSPORT	URANZIAS	BE-LAGER	GA	BER-EU	BE-ANF	
1	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00
2	0.2162400E 01	0.6568798E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.1000000E 01
3	0.4214398E 01	0.1970639E 01	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.2000000E 01
4	0.6189598E 01	0.3941278E 01	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.3000000E 01
5	0.1006480E 02	0.7225677E 01	0.2590669E 02	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.5000000E 01
6	0.1378480E 02	0.1182384E 02	0.1228571E 01	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.7000000E 01
7	0.1718478E 02	0.1773575E 02	0.1326785E 01	0.0000000E 00	0.0000000E 00	0.9000000E 01
8	0.2251678E 02	0.2561830E 02	0.2468846E 02	0.6008376E 03	0.0000000E 00	0.1200000E 02
9	0.3222952E 02	0.3612836E 02	0.2702228E 02	0.7124437E 02	0.2099998E 02	0.1600000E 02
10	0.3832058E 02	0.3547150E 02	0.3557307E 01	0.9185693E 02	0.3099998E 02	0.2000000E 02
11	0.4588797E 02	0.3087332E 02	0.3082022E 01	0.1031166E 03	0.4199998E 02	0.2400000E 02
12	0.5381795E 02	0.2233389E 02	0.0000000E 00	0.9341624E 02	0.3399998E 02	0.2900000E 02
13	0.6228795E 02	0.2233389E 02	0.0000000E 00	0.9211009E 02	0.3399998E 02	0.3400000E 02
14	0.7105797E 02	0.2561830E 02	0.0000000E 00	0.9657529E 02	0.3899998E 02	0.3900000E 02
15	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9869196E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
16	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9758580E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
17	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9647964E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
18	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9537350E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
19	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9426733E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
20	0.7627194E 02	0.2758893E 02	0.0000000E 00	0.9316119E 02	0.4199998E 02	0.4200000E 02
SUMME DER ABS-WERTE						
21	0.8373501E 03	0.4072646E 03	0.8681209E 02	0.1724915E 04	0.1601242E 03	0.4529988E 03
SPEZIFISCHE BARWERTE						
21	0.1952906E 01	0.1069401E 01	0.3305327E 00	0.8055928E 01	0.4529988E 03	0.1601242E 03
SPEZIFISCHE ABS-WERTE						
21	0.1848459E 01	0.8990414E 00	0.1916386E 00	0.3807770E 01		

Tabelle 7: Variante 2 bei
Marktprognose 1:
zeitliche Fixierung
der Ausgaben,
I = 1 : 1981

Dieser Effekt tritt bei den Marktprognosen 2 und 3 ab 1990 ein (Tab. 10 und Tab. 11).

Alle anderen Übergangslösungen sind vereinfachte Fälle dieser Variante 2, die Ergebnisse werden als Funktion der Marktprognose in den Tabellen 9 bis 11 vorgestellt. Listet man die Varianten nach ihren Kosten auf, so erhält man die Tab. 8 wobei das erworbene know how sich proportional zu der Kapitalintensität verhält, ausgenommen die Variante 4, Refabrikation in Amerika. Diese Variante ist nicht nur eine der teuersten, sondern auch die mit geringstem know how, das ja der später zu bauenden Großanlage zugute kommen soll.

Variante	Einsatzzeitpunkt	Barwert von P_{ges} (Mio DM) zum 1.1.1982
3	1989	100
1.1/2	1988	170
1.2/2	1989	200
1.1/4	1988	205
1.2/4	1989	265
2.1/2	1988	290
2.2/2	1989	310
2.1/4	1988	350
2.2/4	1988	380

Tab. 8: Reihenfolge der Varianten geordnet nach steigenden Pönalen
(Marktprognose 1)

In Tabelle 8 wurde nicht berücksichtigt, daß das know how, wenn es nicht selbst in Europa erworben wird, in den USA gekauft werden muß.

Weitere Parameter wie Kalkulationszins, Inflationsrate, höhere Anlagekosten aufgrund von Konstruktionsänderungen können mit dem Modell weiter durchgespielt werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird erstens von den eingegebenen Kostenkurven (siehe Anhang) und zweitens von mehreren Zahlentransformationen - Ganzzahl zu Gleitkommazahl und umgekehrt -, von Genauigkeitsabfragen und von dem kleinsten Zeitschritt 1 Jahr bestimmt. Diese Genauigkeit liegt nur unter Beachtung der formalen Rechentechnik bei etwa 1,5 bis 2 %.

Nr.	Variante	Kapazität Head End W A K (VE/a)	Einsatzzeitpunkt der Großanlage	P ö n a l e (Mio DM)			Barwert von P _{ges.} (Mio DM) zum 1.1.1982
				P _Ü	+	P _k = P _{ges.}	
1.1	Head End und Aschelager	2	1988	135	165	300	170
		2	1989	220	50	270	175
		2	1990	555	5	560	300
		4	1988	170	160	330	205
		4	1989	260	50	310	215
		4	1990	600	-5	595	340
1.2	Head End und Aschetransport in die USA	2	1988	175	205	380	220
		2	1989	230	95	325	200
		2	1990	435	10	445	265
		4	1988	225	220	445	270
		4	1989	305	120	425	265
		4	1990	415	20	435	295
2.1	WAK und U-233-Lager	2	1988	285	165	450	290
		2	1989	390	155	445	310
		2	1990	750	5	755	445
		4	1988	345	160	505	350
		4	1989	455	50	505	370
		4	1990	825	-5	820	510
2.2	WAK und U-233-Transport in die USA	2	1988	300	200	500	320
		2	1989	370	95	465	310
		2	1990	595	10	605	385
		4	1988	355	220	575	380
		4	1989	450	120	570	390
		4	1990	580	15	595	435
3.	Zwischenlager		1988	25	170	195	110
			1989	95	55	150	100
			1990	360	-30	330	200
4.	BE-Transport in die USA		1986	95	430	525	315
			1987	175	335	510	290
			1988	290	240	530	300
			1989	440	160	600	335
			1990	640	80	720	410

Tabelle 9: Pönale für die Übergangsphase in Abhängigkeit vom Einsatzzeitpunkt der großen Wiederaufarbeitungsanlage für 50.000 MWe (Marktprognose 1, Auslastungsgrad der GA 2 = 96 %)

Nr.	Variante	Kapazität Head End WAK (VE/a)	Einsatzzeit- punkt der Großanlage	Auslastungs- grad von GA 1 (%)	P _ü	P ö n a l e (Mio DM)			Barwert von P _{ges.} (Mio DM)	
						+	P _k	=	P _{ges.}	zum 1.1.1902(8 u.20%)
1.1	Head End u. Asche- lager	2	1989	72	105		270		375	160
		2	1990	81	165		150		315	155
		2	1991	90	245		40		285	165
		2	1992	99	370		-75		295	205
		4	1989	72	140		260		400	190
		4	1990	81	200		150		350	185
		4	1991	90	285		35		320	200
		4	1992	99	410		-85		325	240
1.2	Head End u. Asche- transport in die USA	2	1990	78	215		205		420	200
		2	1991	86	355		95		450	195
		2	1992	95	360		-15		345	220
		2	1993	100	630		-80		550	305
		4	1990	76	275		230		505	255
		4	1991	84	350		75		425	260
		4	1992	91	420		25		445	270
		4	1993	100	555		-75		480	315
2.1	WAK und U233-Lager	2	1989	72	270		270		540	290
		2	1990	81	355		150		505	295
		2	1991	90	455		40		495	320
		2	1992	99	605		-85		520	370
		4	1989	72	330		260		590	340
		4	1990	81	415		145		560	350
		4	1991	90	525		30		555	375
		4	1992	99	675		-85		590	430
2.2	WAK und U233 Transp. in die USA	2	1989	69	295		310		605	320
		2	1990	78	365		205		570	315
		2	1991	86	435		95		530	315
		2	1992	95	545		-15		530	350
		4	1989	68	375		330		705	395
		4	1990	76	430		230		660	380
		4	1991	84	520		125		645	390
		4	1992	91	600		30		630	410
3.	Zwischen- lager		1989	72	30		270		300	110
			1990	81	80		165		245	100
			1991	90	155		45		200	110
			1992	99	250		-70		180	140
4.	BE-Transp. in die USA		1988	59	170		435		605	265
			1989	66	260		340		600	260
			1990	73	380		255		635	285
			1991	80	555		145		700	330

Tabelle 10: Pönale für die Übergangsphase in Abhängigkeit vom Einsatzzeitpunkt der großen Wiederaufarbeitungsanlage für 45.000 MWe

(Marktprognose 2, Auslastung der GA 2 = 94 %)

Nr.	Variante	Kapazität Head End, WAK (VE/a)	Einsatzzeit- punkt der Großanlage	Auslastungs- grad der GA 1 (%)	P ö n a l e (Mio DM)			Barwert von P _{ges.} (Mio DM)
					P _ü	+	P _k	= P _{ges.} zum 1.1.1982 (± u.20%)
1.1	Head End u. Asche- lager	2	1988	76	50	190	240	105
		2	1989	85	100	85	185	90
		2	1990	93	170	-15	155	100
		2	1991	100	330	-95	235	155
		4	1988	76	75	175	250	125
		4	1989	85	110	80	190	110
		4	1990	93	180	-15	165	125
		4	1991	100	370	-100	270	190
1.2	Head End u. Asche- transport in die USA	2	1988	72	110	225	335	165
		2	1989	81	135	135	270	135
		2	1990	89	200	40	240	140
		2	1991	97	260	-50	210	150
		2	1992	100	530	-80	450	250
		4	1988	71	175	240	415	230
		4	1989	78	215	160	375	205
		4	1990	86	260	75	335	195
		4	1991	94	350	-15	335	215
		4	1992	100	490	-80	410	305
2.1	WAK und U233-Lager	2	1987	67	160	290	450	255
		2	1988	76	195	195	390	220
		2	1989	83	265	85	350	220
		2	1990	93	360	-15	345	240
		2	1991	100	540	-105	435	310
		4	1987	67	210	285	495	300
		4	1988	76	240	175	415	260
		4	1989	83	300	80	380	260
		4	1990	93	395	-15	380	285
		4	1991	100	605	-100	505	365
2.2	WAK und U233 Transp. in die USA	2	1988	72	225	225	450	255
		2	1989	81	265	135	400	235
		2	1990	89	345	45	390	250
		2	1991	97	415	-30	385	290
		2	1992	100	715	-85	630	375
		4	1988	71	295	250	545	335
		4	1990	78	350	160	510	315
		4	1991	86	410	70	480	315
		4	1992	94	505	-15	490	340
		4	1993	100	660	-85	575	395
3.	Zwischen- lager		1989	85	0	90	90	40
			1990	93	65	-10	55	50
			1991	100	245	-85	160	115
4.	BE-Transp. in die USA		1988	63	90	335	425	195
			1989	70	155	250	405	180
			1990	77	200	230	430	195

Tabelle 11: Pönale für die Übergangsphase in Abhängigkeit vom Einsatzzeitpunkt der großen Wiederaufarbeitungsanlage für 33.000 MWe
(Marktprognose 3, Auslastungsgrad der GA 2 = 92,6 %)

7. Programmbeschreibung

Die Problematik der Systemanalyse wurde mit zwei Programmen erfaßt:

1. Optimierung der endgültigen Lösung im Gleichgewichtsmarkt mit dem Hauptprogramm OPT;
2. Optimierung der Varianten 1,2,3 und 4 mit allen Untervarianten in der Marktanlaufphase mit dem Hauptprogramm VAR.

Falls eine Programmänderung vorgenommen werden muß, kann Variante 3, da sie eine Analogie der endgültigen Lösung ist, mit beiden Hauptprogrammen gerechnet und durch Ergebnisvergleich die Synchronisation dieser Programme wieder hergestellt werden. Werden dagegen nur Parameter, z. B. anderer Zinssatz, geänderte Marktprognose usw. ausgetauscht, muß der erste Lauf immer mit dem HP OPT vorgenommen werden. Er liefert mit seinen spezifischen Endergebnissen die Eingabeparameter für den zweiten Lauf mit dem HP VAR; eine Synchronisation der beiden Hauptprogramme muß in diesen Fällen nicht vorgenommen werden. Folgende Eingabeparameter müssen aus den Ergebnismatrizen des HP OPT bei der optimalsten EKAP-T-Kombination entnommen werden:

<u>Name im Programm</u>	<u>Symbol der Gleichungen</u>	<u>Bedeutung</u>
XM	$A_{GA}^{**} 2 / BER_{STAT}^{**}$	spez. Barwert der GA 2
XABSGA	$A_{GA} 2 / BER_{STAT}$	spez. Absolutwert der GA 2
XGOPT	$XGES_{ABS, STAT}$	Spez. Gesamtwert der Optimierung
SPEOPT	-	Delta der spez. Barwerte BELA bei 20 % und 8 % Abdiskontierung

Die meisten Feld-, Konstanten-, Logical- und Variablenamen haben in beiden Programmen analoge Aufgaben. Name und Inhalt bzw. Bedeutung sind in Tabellen aufgelistet. Zu jedem Programm existiert ein Strukturplan, der schematisch den Programmablauf darstellt und zusammen mit ungefähr 200 Kommentar-Karten im Listing ein schnelles Einarbeiten ermöglicht.

Es werden bewußt keine Daten und Konstanten durch Read-Befehle eingelesen, sondern alle Größen durch Klarsichtzuweisungen dem Modell mitgeteilt. Die notwendigen Steuergrößen erhalten in den Programmen Standardwerte, die gegebenenfalls überschrieben werden müssen.

Felder des HP VAR

Fast alle Felder für Zwischenergebnisse sind auf 40 Speicherplätze dimensioniert, ein Speicherplatz beinhaltet die Ergebnisse einer Abrechnungsperiode I; Die Felder der Endergebnisse stellen zweidimensionale Matrizen dar.

Feldname	Nummer	Inhalt
AUSG (I)	1	Ausgaben GA
AUSHE (I)	2	Ausgaben HE
AUSWAK (I)	3	Ausgaben WAK
AUSL (I)	4	Ausgaben BE-Lager
AUSLUR (I)	5	Ausgaben Uran-Lager
AUSLAS (I)	6	Ausgaben Asche-Lager
AUSUR (I)	7	Uran-Zins
AUSTR (I)	8	Ausgaben-Transport
EING (I)	9	Einnahmen der GA
BEMPR (I)	10	Anzahl der BE _{ANF}
BEUSA (I)	11	für I = 1,..., 15 Anzahl der in den USA refrabrizierten BE
BEUSA (I > 15) = USA (I)	12	Ausgaben für Transport, HE, WA und REF in den USA
SBEIL (I)	13	Summe der gelagerten BE
BEIGA (I)	14	BE-Input GA
BEIHE (I)	15	BE-Input HE
BEIWAK (I)	16	BE-Input WAK
BEILBE (I)	17	BE-Input BE-Lager
BEILUR (I)	18	BE-Input Uran-Lager
BEILAS (I)	19	BE-Input Asche-Lager
BER (I)	20	Zahl der in Europa refabrizierten BE
BEOHE (I)	21	BE-Output HE
BEOWAK (I)	22	BE-Output WAK
BEOLBE (I)	23	BE-Output BE-Lager
BEOLUR (I)	24	BE-Output Uran-Lager
BEOLAS (I)	25	BE-Output Asche-Lager
ANU (I)	26	Summe der jährlichen Annuitäten des BE-Lagers
ANL 1 (I)	27	Aktuelles Anlagevermögen aufgrund des 1.Blockes des BE-Lagers

Feldname	Nummer	Inhalt
ANL 2 (I)	28	Aktuelles Anlagevermögen aufgrund des 2. Blockes des BE-Lagers
ANG (I)	29	Aktuelles Anlagevermögen der GA
<u>Ergebnis-Matrizen:</u>		
ERG (IVAR,TX)	30	Summe der spezifischen Barwerte
ERG 1 (IVAR,TX)	31	Barwert der Pönale P_{GES}
ERG A (IVAR,TX)	32	Barwert der Pönale P_0
ERG 2 (IVAR,TX)	33	Summe der spezifischen Absolutwerte
ERG B (IVAR,TX)	34	Absolutwert der Pönale P_{GES}
ERG 3 (IVAR,TX)	35	Absolutwert der Pönale P_0
ERG 4 (IVAR,TX)	36	Absolute Anzahl der refabrizierten Brennelemente BER
ERG C (IVAR,TX)	37	Absolute Anzahl der in Europa refabrizierten Brennelemente BER_{EU}
ERG D (IVAR,TX)	38	Absolute Anzahl der refabrizierten Brennelemente der Fläche F_B (siehe Abb. 2)
ERG E (IVAR,TX)	39	Auslastungsgrad PHI der GA 1
ERG F (IVAR,TX)	40	Summe der refabrizierten Brennelemente $BER_{EU} + USA$ bei 8 % Abdiskontierung
ERG G (IVAR,TX)	41	Summe der refabrizierten Brennelemente BER_{EU} bei Abdiskontierung mit ZSKA
ERG H (IVAR,TX)	42	Differenz der Auslastungsgrade der GA 2 und GA 1

Felder des HP OPT

In der Spalte "Inhalt" werden nur die Felder erklärt, die nicht in dem Programm VAR vorkommen.

Feldname	Nr.-OPT	Nr.-VAR	Inhalt
AUSG (I)	1	1	
AUSL (I)	2	4	
URAN (I)	3	7	
AUSTR (I)	4	8	
EING (I)	5	9	
BEMPR (I)	6	10	
SBEIL (I)	7		Summe aller anfallenden Brennelemente
BEL (I)	8	13	
BEIG (I)	9	14	
BEIL (I)	10	17	
BER (I)	11	20	
BEOL (I)	12	23	
ANU (I)	13	26	
ANL 1 (I)	14	27	
ANL 2 (I)	15	28	
ANG (I)	16	29	
FTXSOL (TX)	17	-	Vorgegebener Einsatzzeitpunkt T_X der GA = TXSOLL
FIXIST (TX)	18	-	Vom Programm errechneter Einsatzzeit- punkt TX = TXIST
FEKAP (EKAP)	19	-	Vorgegebene Kapazität der GA
PARAM (5)	20	-	Parameter für das Zeichenprogramm
XG (J)	21	-	Zwischenergebnis: Summe der aktuellen spez. Werte
XG 1 (J)	22	-	Zwischenergebnis: aktuelle spez. Ko- sten der GA
			<u>Ergebnis-Matrizen:</u>
XOPT (EKAP,TX)	23	30	Entscheidungsmatrix: Summe der spez. Werte, wobei $A_{GA\ 1}$ und A_{BELA} mit $ZSKA$, A_{TR} und A_{UR} mit 8 % abdiskontiert sind.

Feldname	Nr.-OPT	Nr.-VAR	Inhalt
VOPT (EKAP,TX)	24	-	Summe der spez. Werte für alle Ausgabenströme mit 8 % abdiskontiert
XOPT 4 (EKAP,TX)	25	33	Summe der spez. Absolutwerte
XOPT 5 (EKAP,TX)	26	-	spez. Barwert der GA 2 mit ZSKA abdiskontiert
VOPT 1 (EKAP,TX)	27	-	spez. Barwert der GA 2 mit 8 % abdiskontiert
XOPT 3 (EKAP,TX)	28	-	spez. Absolutwert der GA 2
VOPT 2 (EKAP,TX)	29	-	spez. Barwert des BELA mit ZSKA abdiskontiert
XOPT 1 (EKAP,TX)	30	-	spez. Barwert des BELA mit 8 % abdiskontiert
VOPT 4 (EKAP,TX)	31	-	spez. Barwert der Transportkosten mit 8 % abdiskontiert
VOPT 3 (EKAP,TX)	32	-	spez. Barwert der Uranzinsen mit 8 % abdiskontiert
VOPT 5 (EKAP,TX)	33	-	absolute Anzahl der refabrizierten Brennelemente BER
XOPT 2 (EKAP,TX)	34	40	Summe der mit 8 % abdiskontierten Anzahl der BER
XOPT 6 (EKAP,TX)	35	41	Summe der mit ZSKA abdiskontierten Anzahl der BER
XOPT 7 (EKAP,TX)	36	39	Auslastungsgrad PHI der GA 2
XOPT 8 (EKAP,TX)	37	38	Absolute Anzahl der BER der Fläche F_B (s. Abb. 2)

Hauptprogramm OPT

Folgende Steuergrößen bestimmen die Parameterzusammensetzung unter der die oben beschriebenen vier Kostenströme optimiert werden:

I PROG = 1	Marktprognose BRD, pess.
I PROG = 2	Marktprognose BRD, real
I PROG = 3	Marktprognose Europa
OPT = 1	Optimierung im Gleichgewichtsmarkt
OPT = 0	Optimierung in der Markteinführungsphase, kann ebenfalls mit I PROG = 1,2,3 durchgeführt werden und entspricht der Variante 3

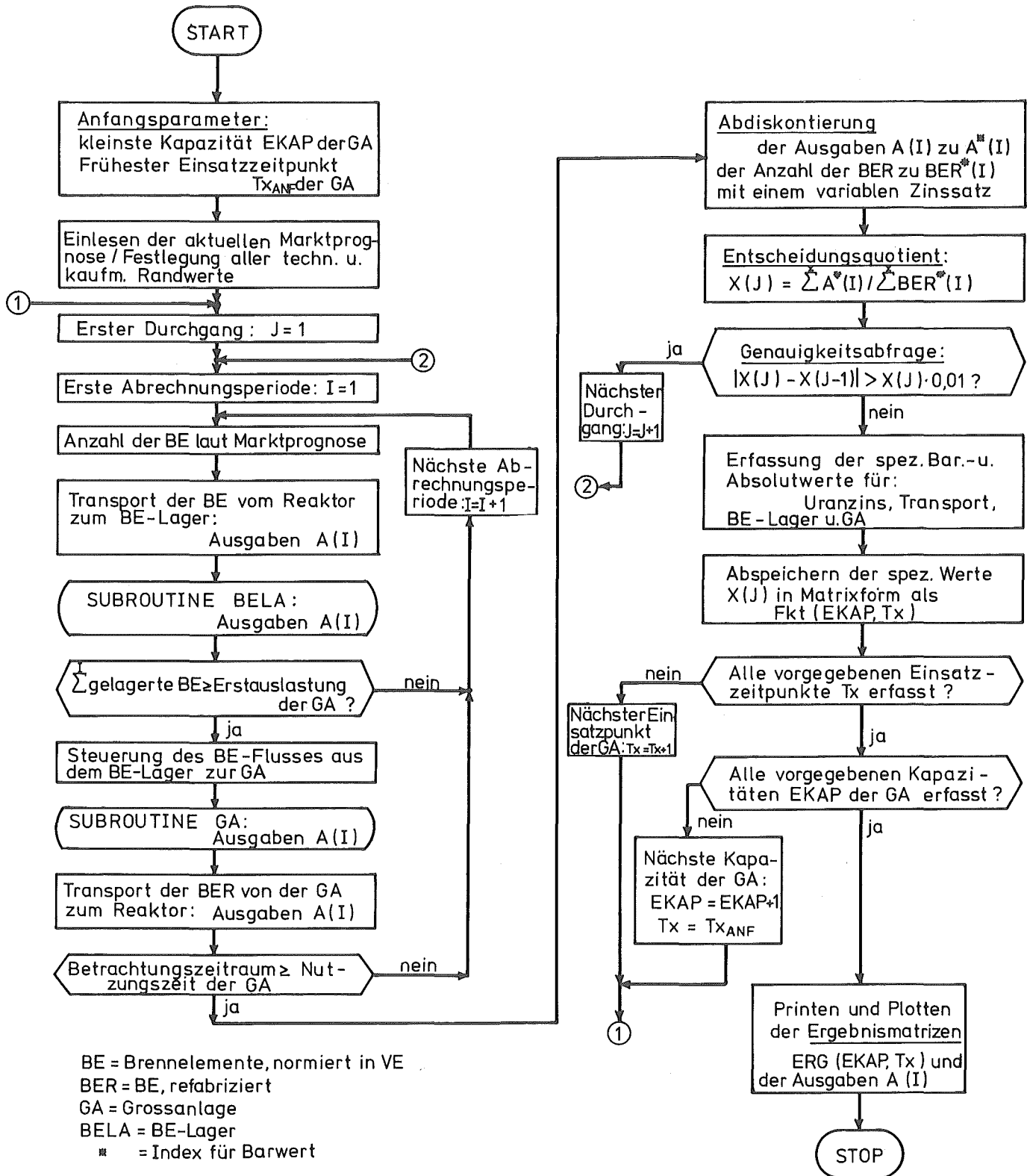


Abb:12 Vereinfachter Strukturplan der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt

ZSFK	Zinssatz - Fremdkapital
ZSKA	Kalkulationszins = Abdiskontierungszinssatz
UMFA	Umrechnungsfaktor, entspricht dem in einem BE gebundenen Kapital
UMKA	Umrechnungsfaktor, erfaßt das Umlaufkapital
SCHL	Schlupf, ist gleich dem Verhältnis der anfallenden BE zu den refabrizierten
STSA	Steuersatz

In dem Hauptprogramm werden alle Einnahmen- und Ausgabenströme der GA, des BE-Lagers, des Transports und der Uranzins abdiskontiert, auf den BE-Fluß bezogen und in Matrizen abgespeichert. Diese Teilschritte werden für bis zu 20 verschiedene GA, gesteuert durch EKAP, kombiniert mit bis zu 9 verschiedenen Einsatzzeitpunkten, gesteuert durch TX, durchgerechnet. Jede TX-EKAP-Kombination wird bei Modell II bis zu ihrem stationären Endwert durchgespielt, siehe hierzu den Strukturplan der Optimierung im Gleichgewichtsmarkt.

Setzt man die logische Größe $PLOT = .TRUE.$, werden die Endergebnismatrizen aller spez. Barwerte als dreidimensionale Computerzeichnungen geplottet, indem 16 mm DIAs erstellt werden (s. Abb. 12)

Die fest eingegebenen Werte für $EKAP_{MIN}$, $EKAP_{MAX}$, TX_{MIN} und TX_{MAX} erfassen mit ihrer Bandbreite das erwartete, zweidimensionale Optimum als Funktion der Marktprognose. Einen Programmablauf mit den CALL-Befehlen aller benötigter Unterprogramme zeigt in vereinfachter Form der Strukturplan "Optimierung im Gleichgewichtsmarkt". Die Anlagenkostenkurven sowie die laufenden fixen und variablen Betriebskostenkurven aller Kostenstellen befinden sich im Anhang.

Hauptprogramm VAR

Das Hauptprogramm VAR ruft die einzelnen Varianten und Untervarianten der Übergangslösung mit Hilfe der Steuergröße IVAR auf:

IVAR = 1	Variante 1
IVAR = 2	Variante 2
IVAR = 3	Variante 3

Zu jeder Variante wird durch die logische Größe $ALT = .TRUE.$ die USA-Alternative aufgerufen. Der zeitliche Ablauf aller Übergangslösungen wird mit dem Einsatzzeitpunkt T_X der GA 1 beendet, wobei die Kapazität der GA 1 ebenfalls

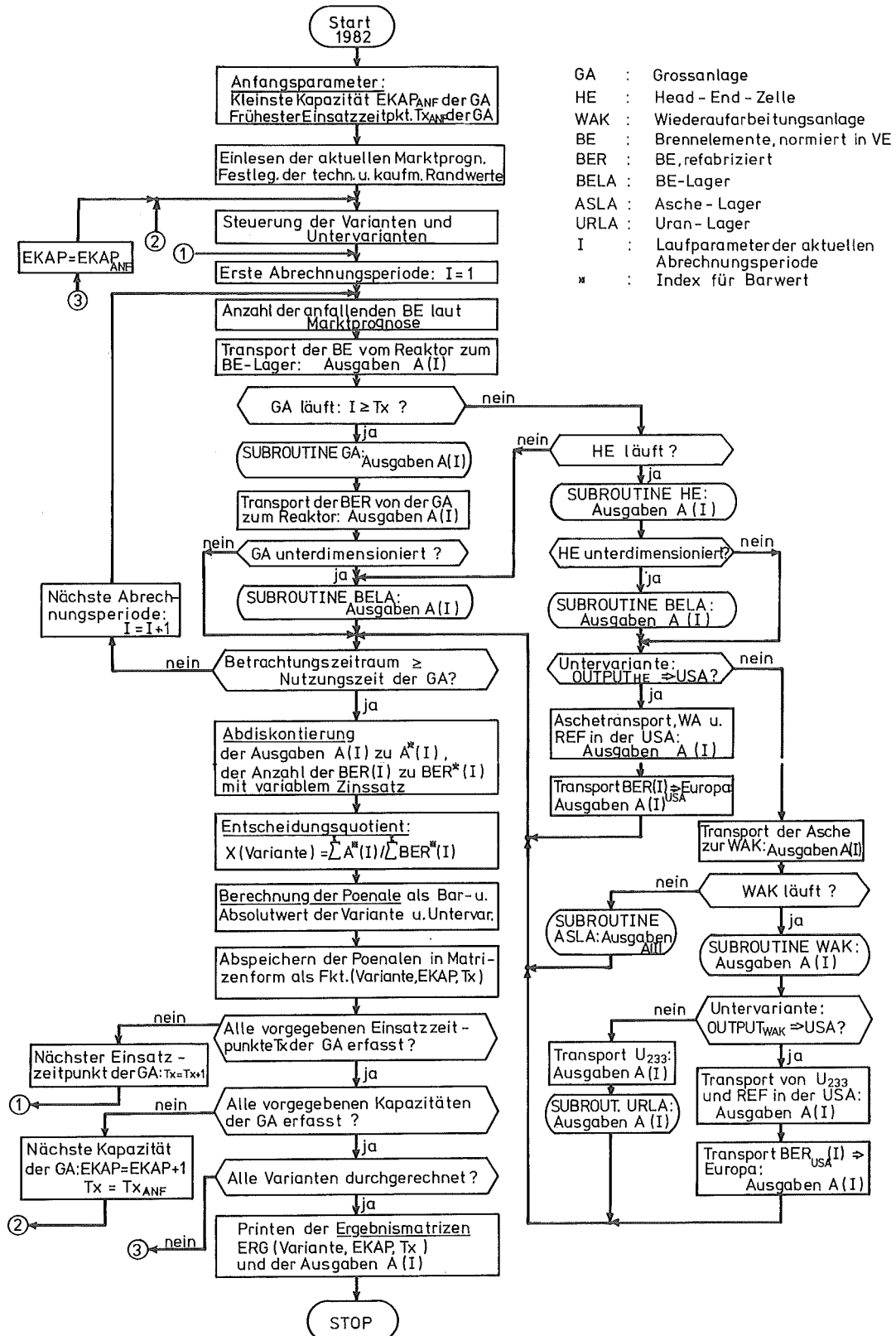
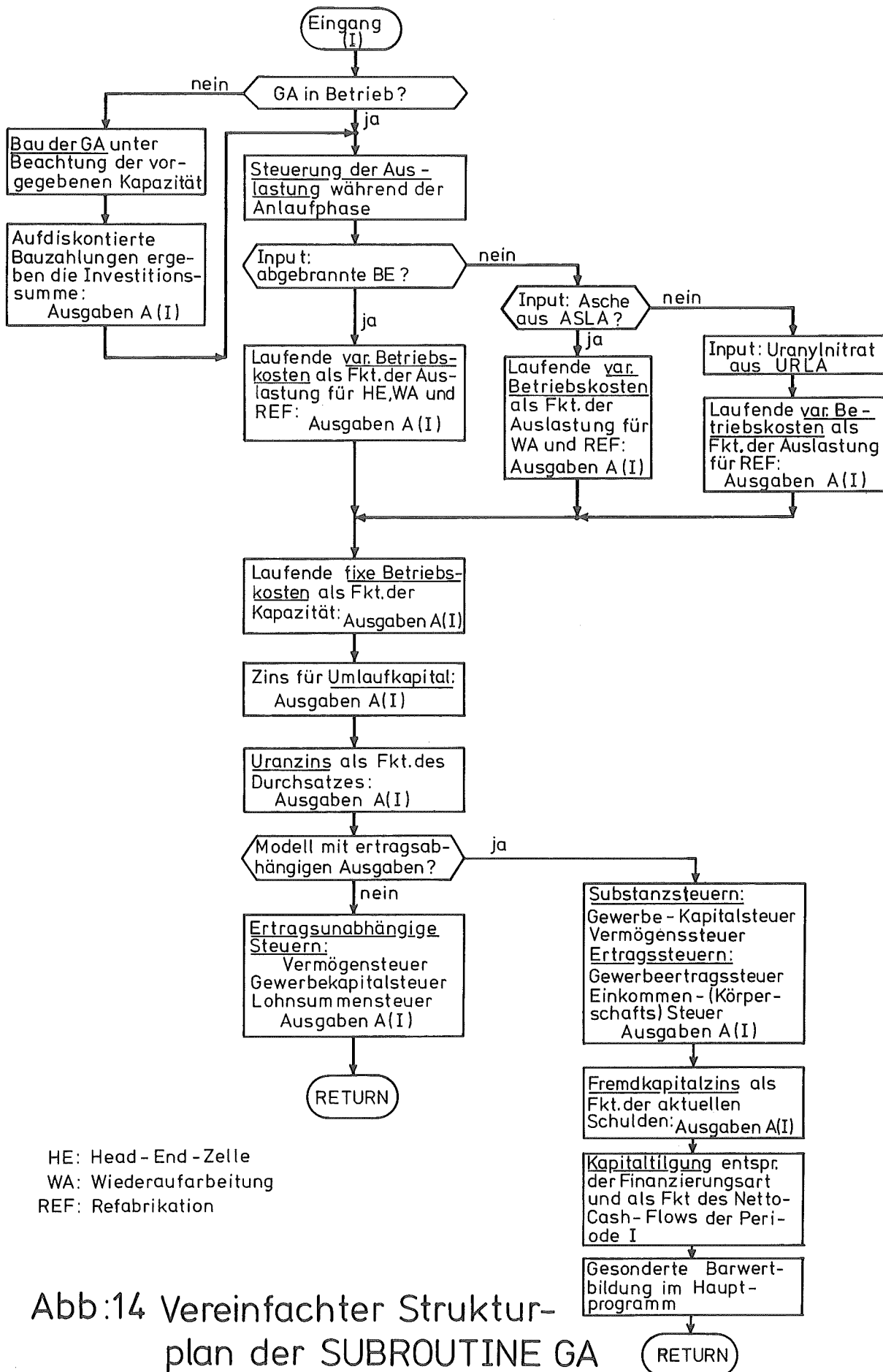


Abb.13 Vereinfachter Strukturplan des Varianten -
programms



variabel ist. Der Parameter IPROG legt die aktuelle Marktprognose aus Abb.1 fest. Die Koordination aller Parameter übernimmt die SUBROUTINE LEIT; die Ausgangswerte aller Konstanten und Variablen setzt die SUBROUTINE ANWERT. Den gesamten Programmablauf zeigt vereinfacht der Strukturplan in Abb. 13.

SUBROUTINE GA

Dieses Unterprogramm wird von dem HP OPT und von dem HP VAR aufgerufen. Es erfaßt im ersten Fall die GA 2 ($=GA_{OPT}$), im zweiten Fall die GA 1 ($=GA_X$). Hier werden alle Ausgabenströme für Investitionen, für laufende variable und fixe Betriebskosten als Funktion der Auslastung PHI periodenweise erfaßt. Alle weiteren Informationen können dem Strukturplan der Großanlage in Abb. 14 entnommen werden.

SUBROUTINE BELA

Hier werden die Investitionssumme und die laufenden Zahlungen für die Zwischenlagerung der abgebrannten BE als Funktion des Lagerbestandes periodenweise abgespeichert. Das Brennelementlager wird in Einheiten á 14 VE gebaut. Die Steuergröße MGAS regelt zwei Modifikationen:

MGAS = 0	Lagerung der BE in Kannen
MGAS = 1	Lagerung der BE in Körben, was eine Gasreinigung der BE-Blocklager voraussetzt.

Den Funktionsablauf dieses Unterprogramms stellt der Strukturplan "SUBROUTINE BELA" in Abb. 15 dar.

SUBROUTINE HE und WAK

Die beiden SUBROUTINEN HE und WAK sind analog aufgebaut und können hier somit zusammen abgehandelt werden. Beide Anlagen werden mit der Kapazität 2 VE und 4 VE durchgerechnet. Während ihrer Betriebszeit ITBE werden sie linear abgeschrieben und stehen zum Zeitpunkt T_X mit Null zu Buche. Die Erfassung aller Ausgabenströme unterliegt dem gleichen Algorithmus wie der aller anderen Kostenstellen; den formalen Ablauf zeigt der entsprechende Strukturplan in Abb. 16.

SUBROUTINE ASLA und URLA

Diese beiden Programme speichern die kostenmäßige Erfassung der Zwischenlagerung der Asche als Output der HE bzw. des Uranylinitrats als Output der WAK.

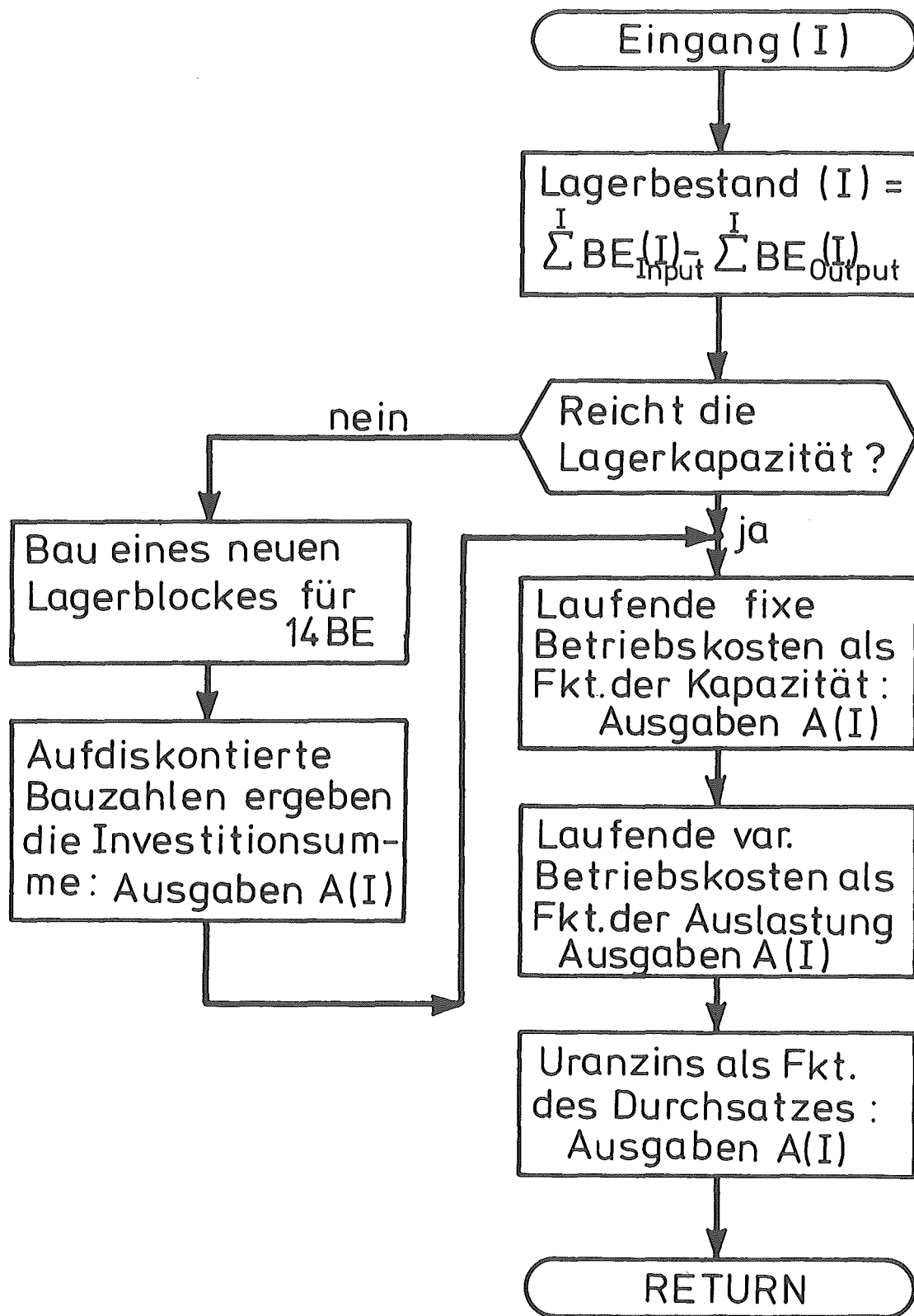


Abb.15 Vereinfachter Strukturplan
der SUBROUTINE BELA

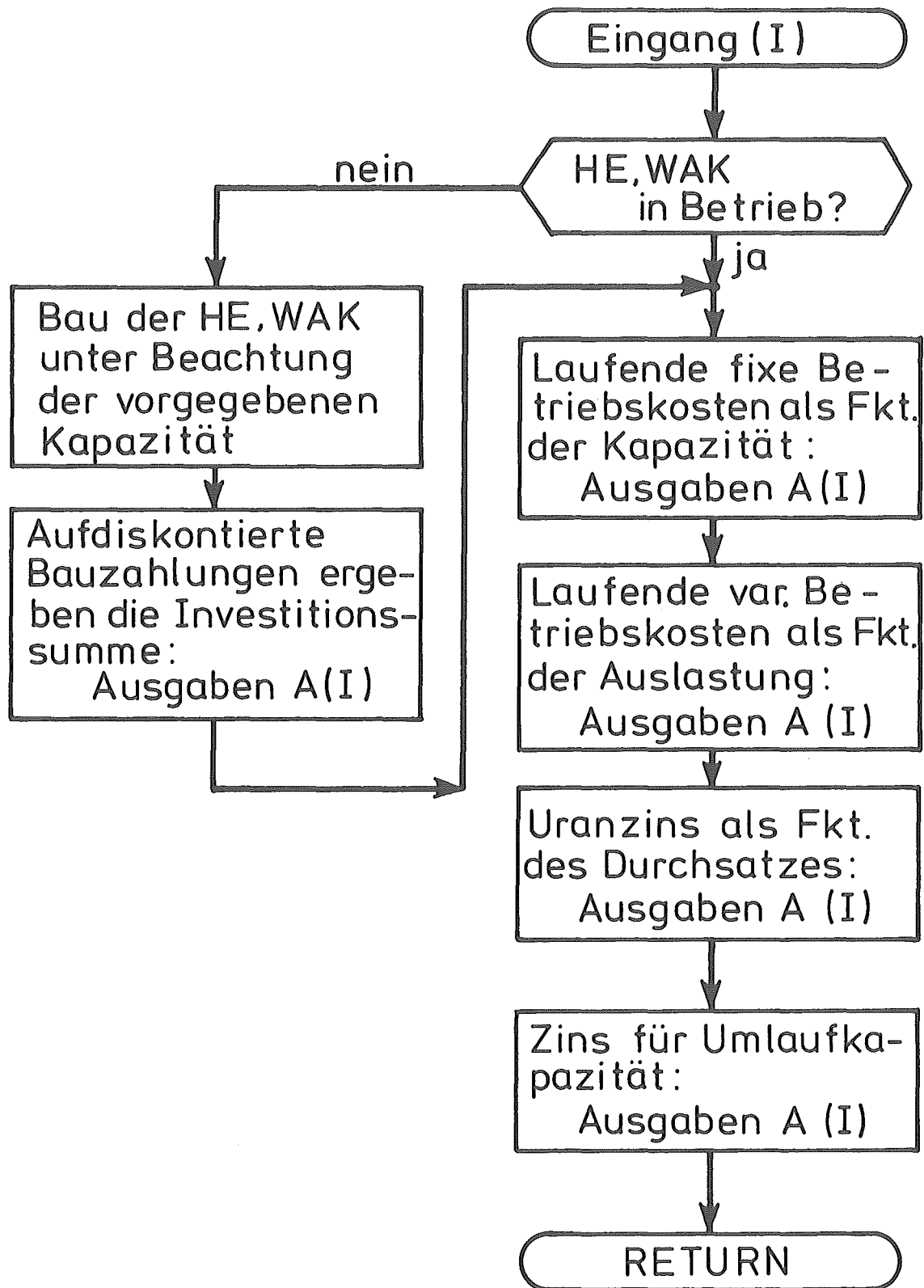


Abb.16 Vereinfachter Strukturplan
der SUBROUTINEN HE und WAK

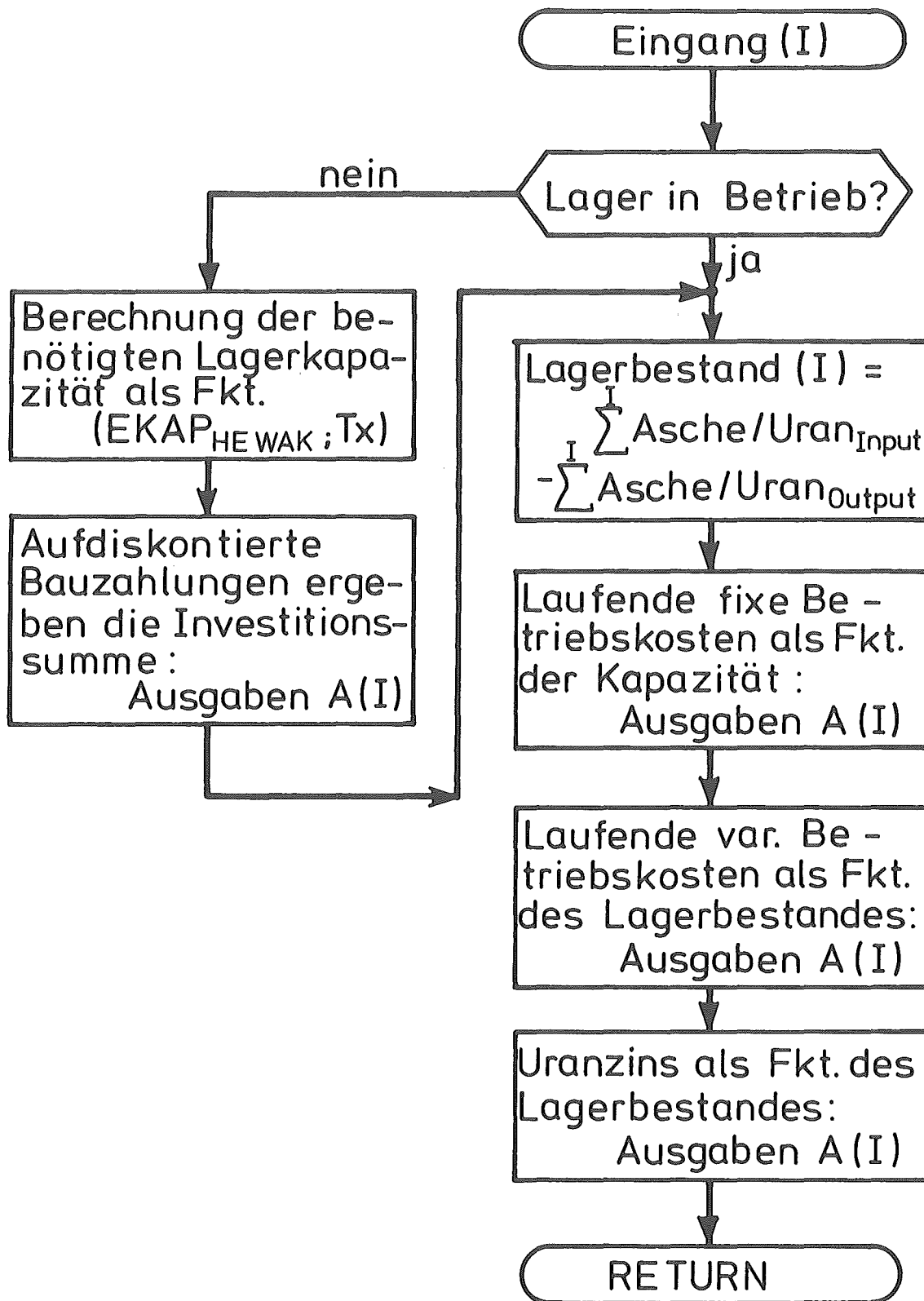


Abb.17 Vereinfachter Strukturplan der SUBROUTINEN ASLA und URLA

Die benötigte Lagerkapazität wird als Funktion der Betriebsdauer ITBE der HE bzw. WAK, als Funktion ihrer Kapazität und als Funktion der aktuellen Marktproggnose berechnet. Der Strukturplan "SUBROUTINE ASLA und URLA" zeigt schematisch diesen Sachverhalt (Abb. 17).

SUBROUTINE TRANS

Alle anfallenden Transportausgaben werden in der SUBROUTINE TRANS als Funktion des Laufparameters NI periodenweise entsprechend der Menge des jährlich anfallenden Transportgutes abgespeichert. Der Parameter NI steuert neben den europäischen Transporten auch alle in den USA fälligen Zahlungen für Dienstleistungen sofern der äußere Brennstoffkreislauf über amerikanische Einrichtungen geschlossen wird. Dieser Fall tritt in den Untervarianten 1.2 und 2.2 sowie in der Variante 4 ein. Eine weitere Variation, Parameter NI gleich elf, beinhaltet den Bezug von fuel sticks aus den USA während dem ganzen Betrachtungszeitraum als Alternative aller europäischen Lösungen.

Die Abspeicherung der verschiedenen Transportausgaben als FKT (NI) wird hier tabellarisch vorgestellt.

NI	Transportgut	Transportstrecke		Erfasste Ausgaben A (I)
		von	nach	
1	abgebrannte BE	HTR	HE	Transport
2	abgebrannte BE	HTR	BELA	Transport
3	abgebrannte BE	HTR	GA	Transport
4	abgebrannte BE	HTR	USA	Transport HE _{USA} WA _{USA} REF _{USA}
	refabrizierte BE	USA	HTR	Rücktransport
5	refabrizierte BE	GA	HTR	Rücktransport
6	Uranasche	HE	WAK	Transport
7	Uranasche	HE	ASLA	Transport
	Uranasche	ASLA	GA	Transport

NI	Transportgut	Transportstrecke		Erfasste Ausgaben A (I)
		von	nach	
8	Uranasche	HE	USA	Transport
				WA _{USA}
				REF _{USA}
9	Uranynitrat	WAK	URLA	Transport
				Transport
				Transport
10	Uranynitrat	WAK	USA	Transport
				REF _{USA}
				Rücktransport
11	abgebrannte BR	HTR	USA	Transport
				HE _{USA}
				WA _{USA}
				REF _{USA}
				Rücktransport
	fuel sticks	USA	HTR	Transport

- |11| The Future Reprocessing in Europe
FORATOM-Study, Feb. 1970

- |12| Report GA-10784 (1971)
 (classified)

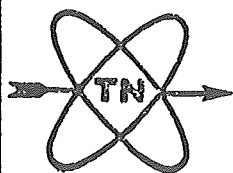
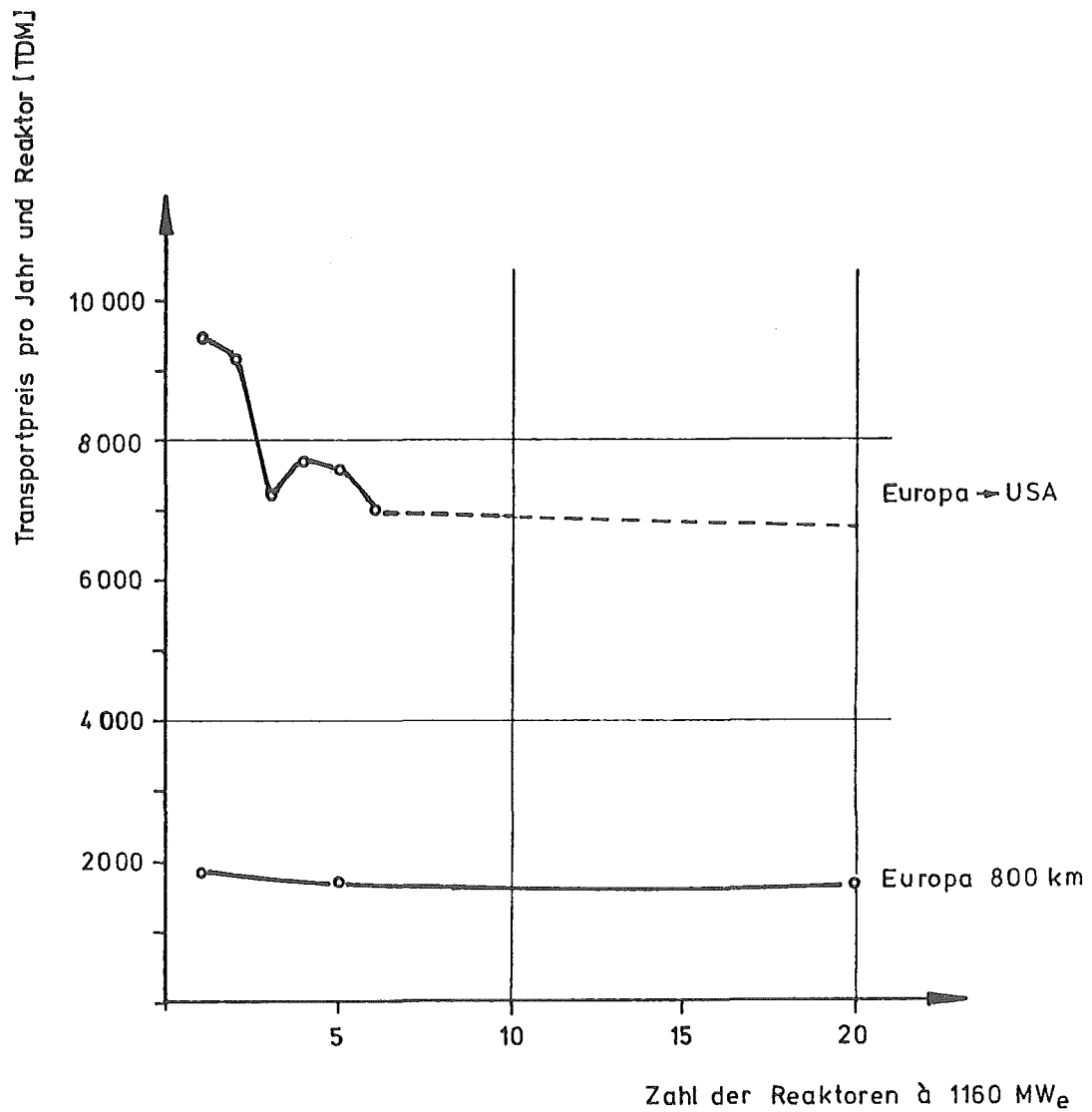
- |13| Bechtel Corp. HTGR-Fuel-Reprocessing Study
 prepared for GGA March 1971 (classified)

- |14| AEC Conceptual High-Temperature Gas-
 Cooled Reactor (HTGR)
 Fuel Processing Plant
 WASH - 1152 (1970)

A N H A N G

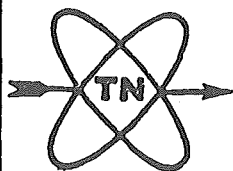
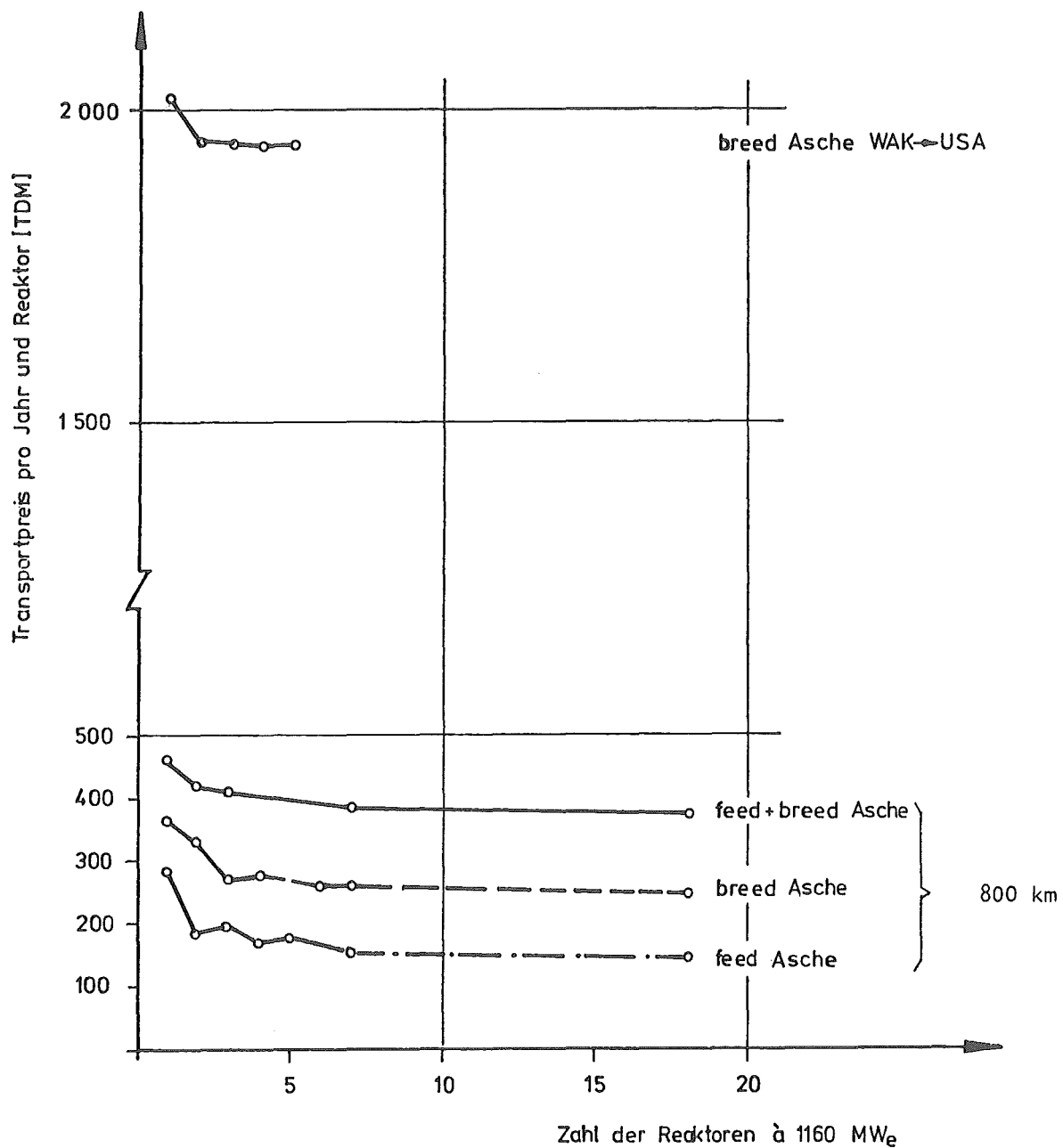
J A H R	1	2	
	E W G realistisch	B R D realistisch	B R D pessimistisch
1980	1	1	1
81	2	1	1
82	3	2	2
83	5	3	3
84	7	4	4
85	9	5	5
86	12	7	7
87	16	9	9
88	20	11	11
89	24	13	13
1990	29	16	15
91	34	19	17
92	39	22	19
93	44	25	21
94	49	28	23
95	54	31	25
96	60	35	27
97	66	39	29
98	72	43	31
99	78	47	33
2000	84	51	35

Tabelle A 1: Marktprognosen (Anzahl der installierten 1160 MWe-HTR)



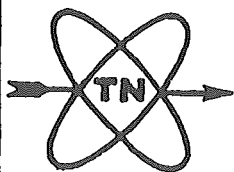
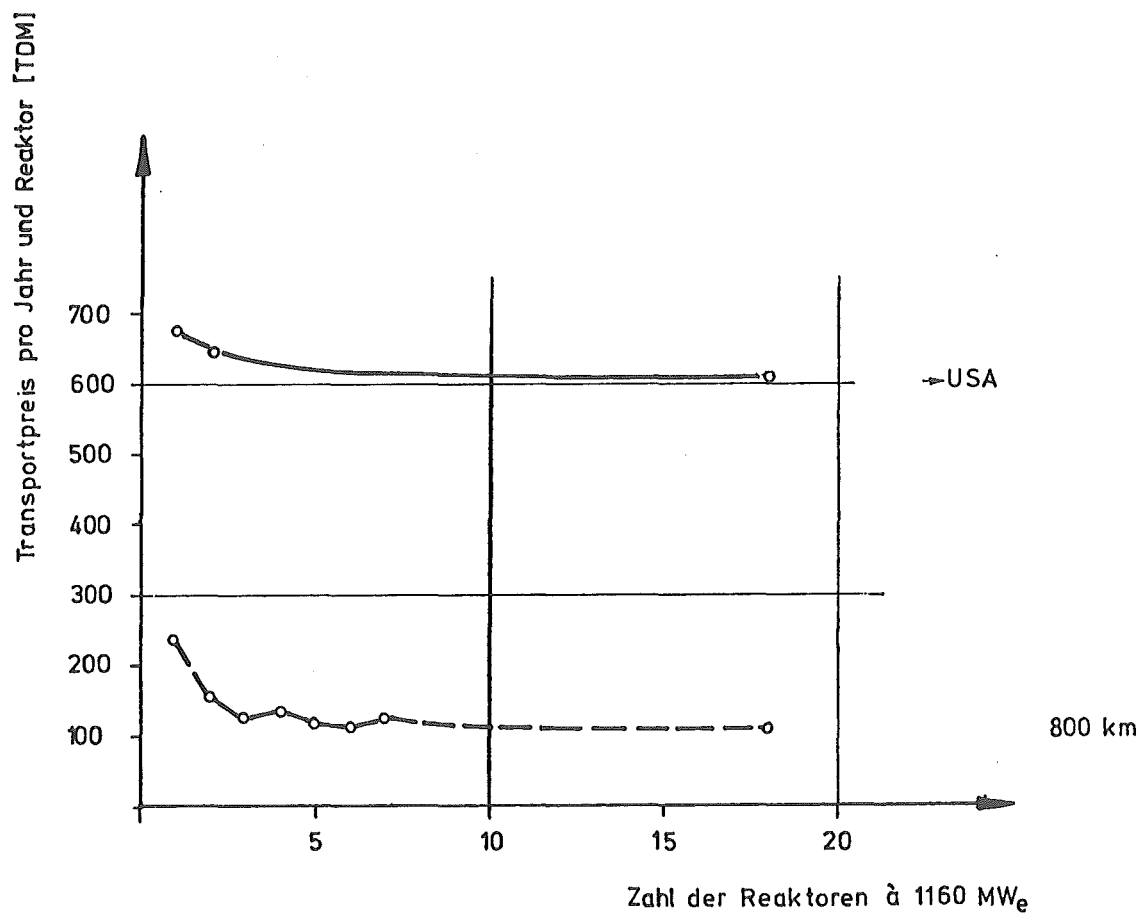
Richtpreise für den Transport ab-
gebrannter Blöcke im GGA-Behälter

Abb. A1



Richtpreise für den Transport
von feed- und breed Asche

Abb. A2



Richtpreise für den Transport
von Uranyl-Nitrat

Abb.A 3

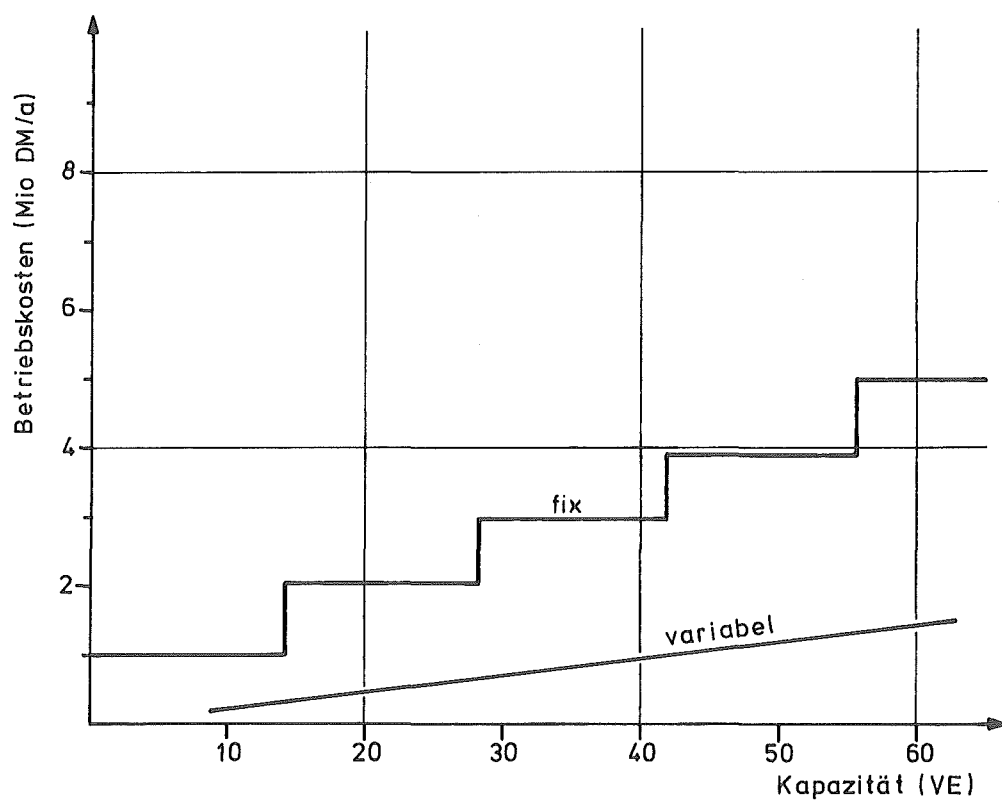
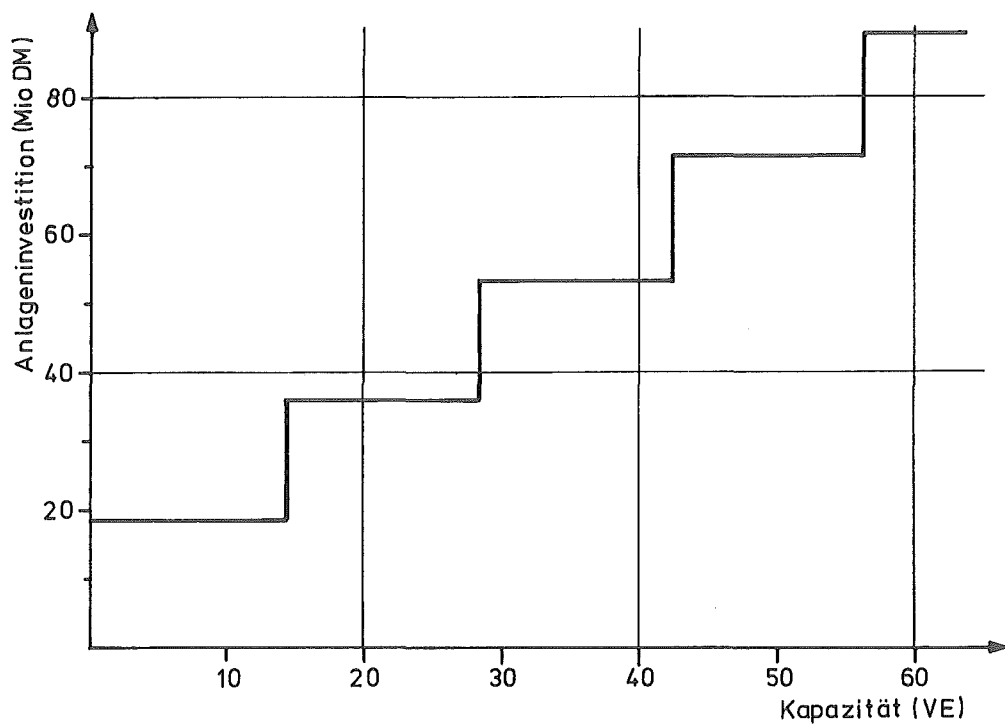


Abb. A 4

Kosten d. Zwischenlagers für Blöcke

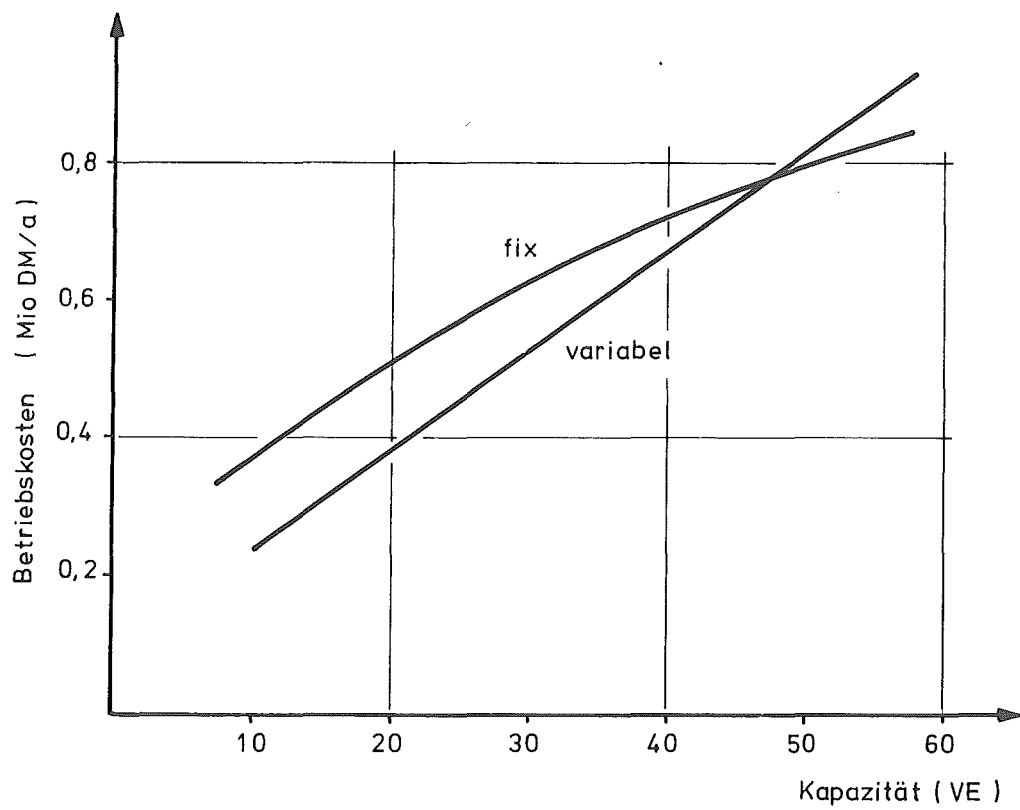
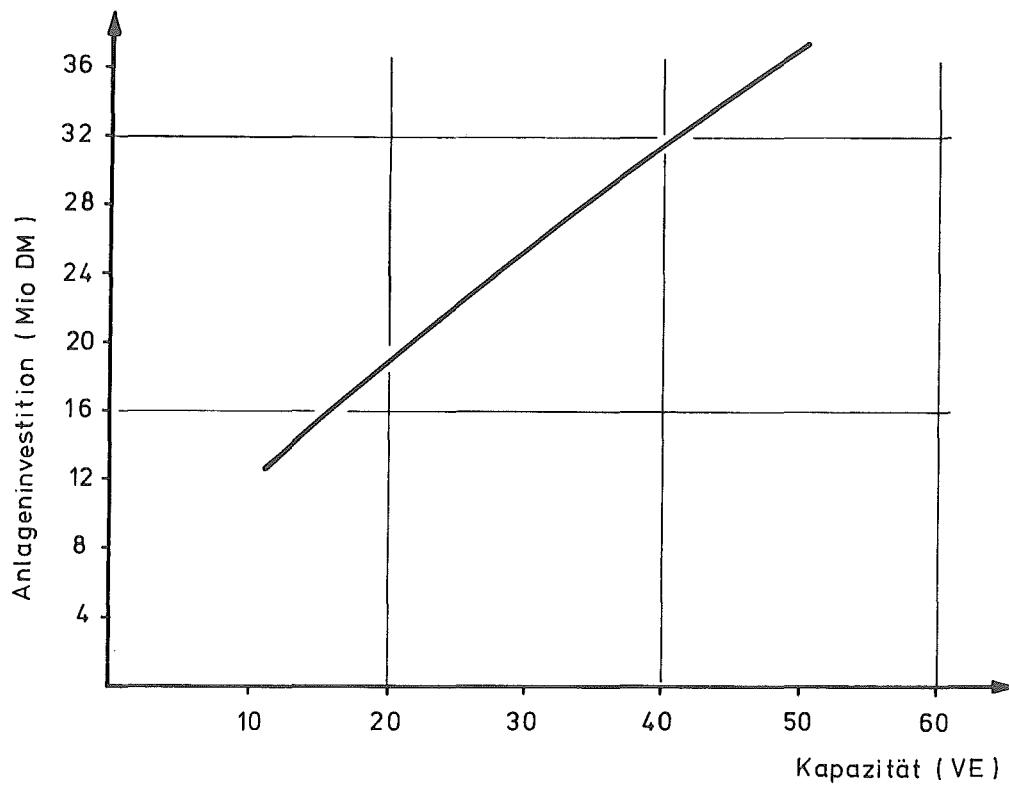


Abb. A5

Kosten des Aschelagers (feed u. breed)

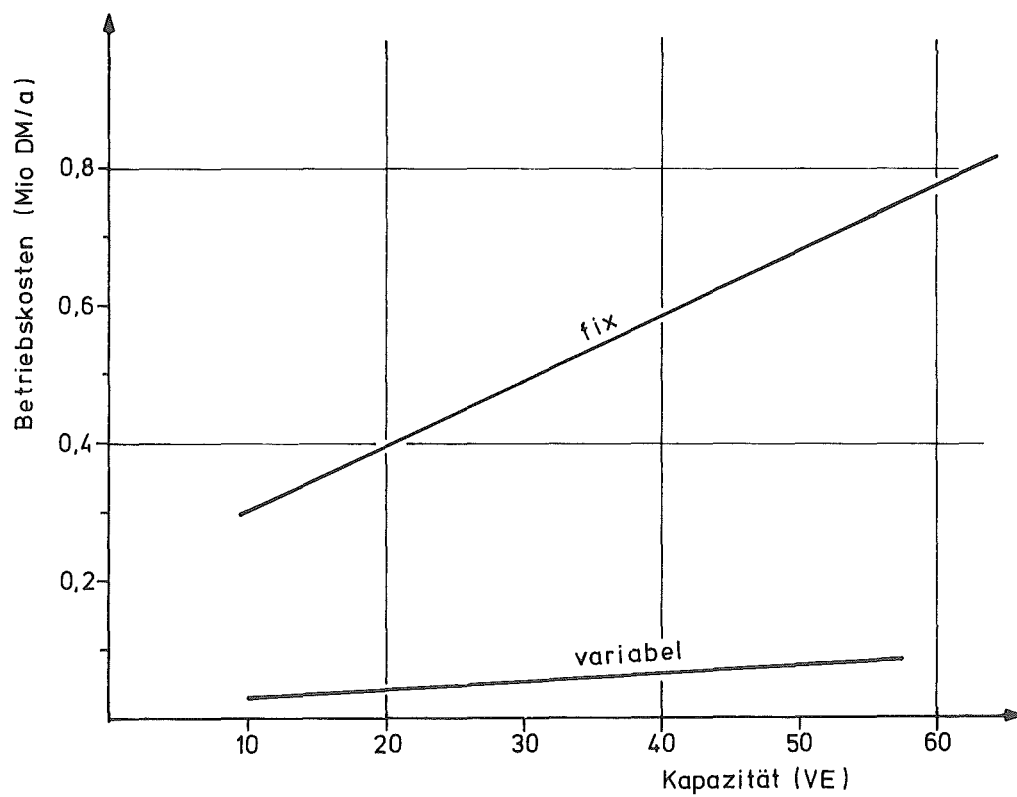
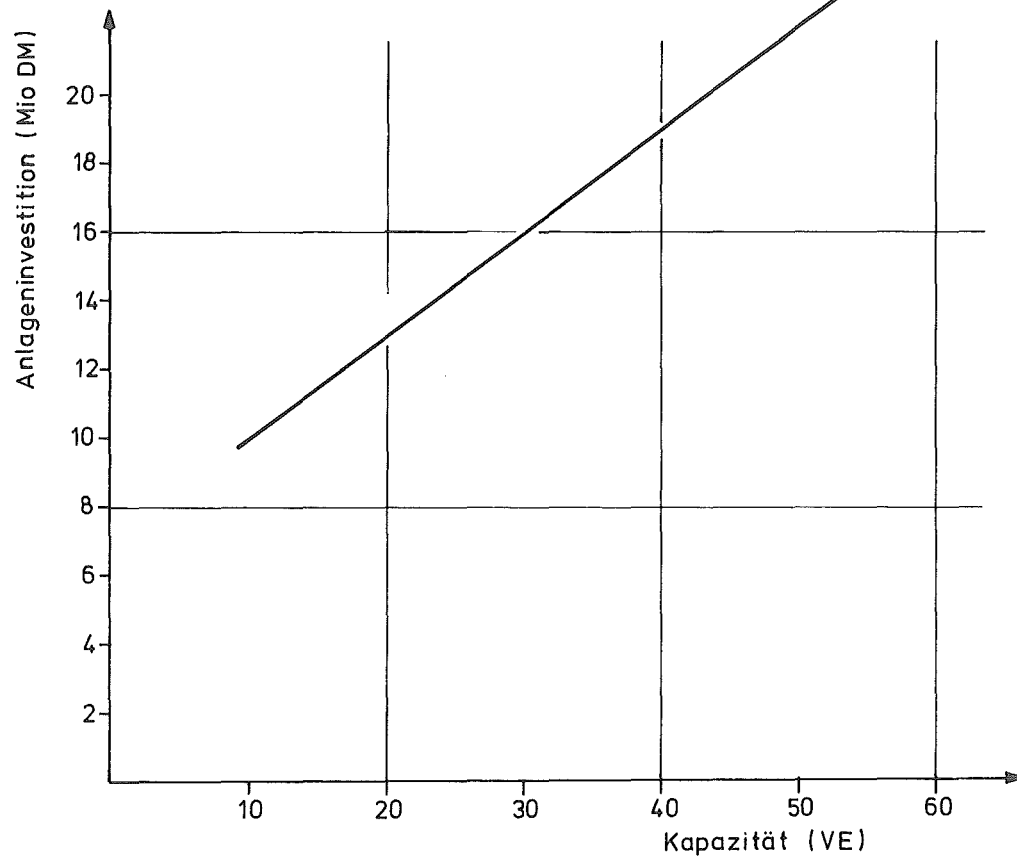


Abb. A6

Kosten des U-233 Lagers

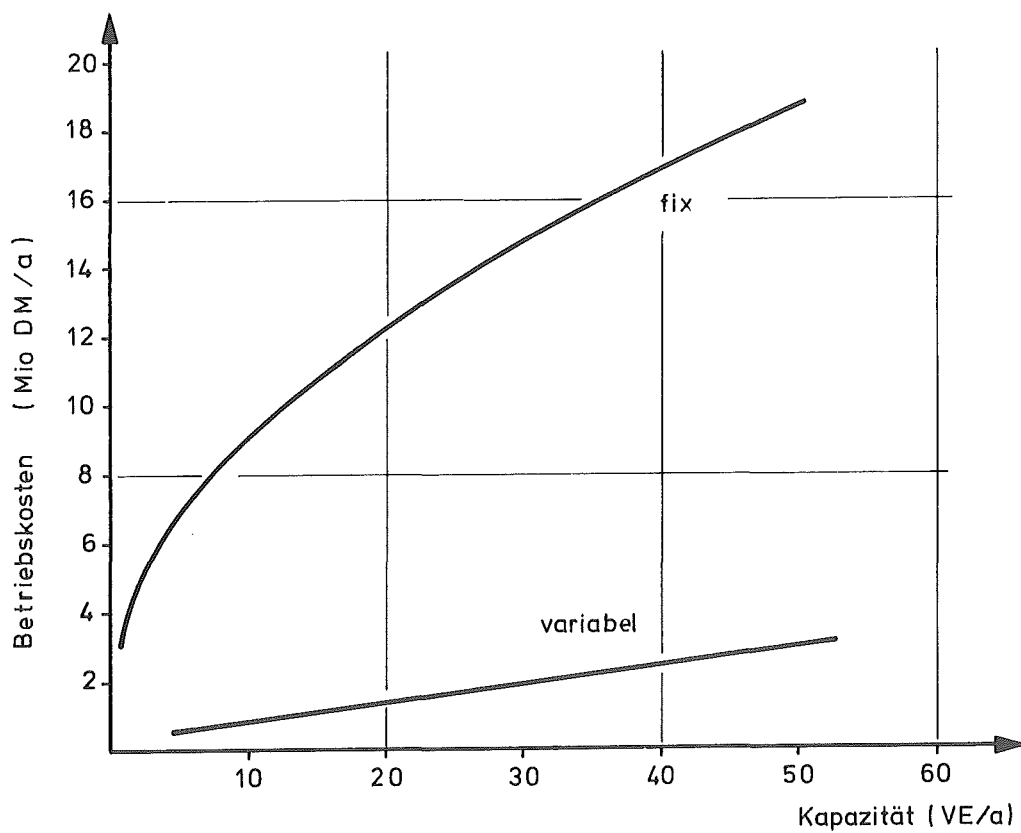
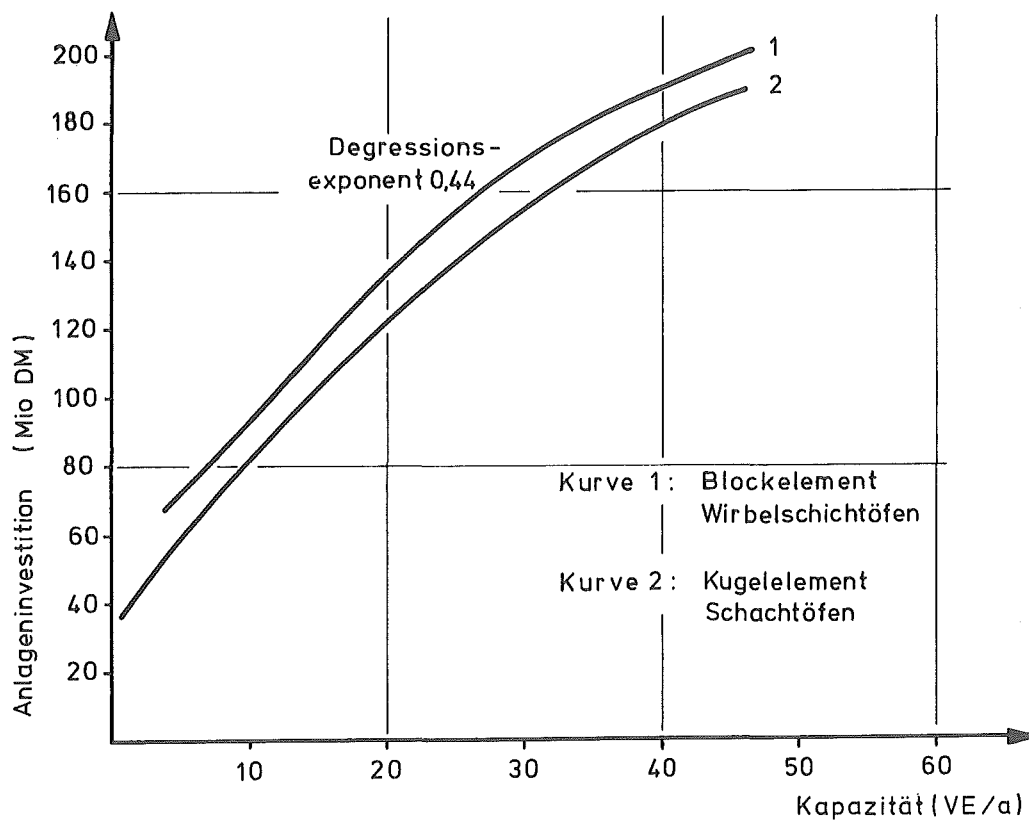


Abb. A7

Kosten des Head End

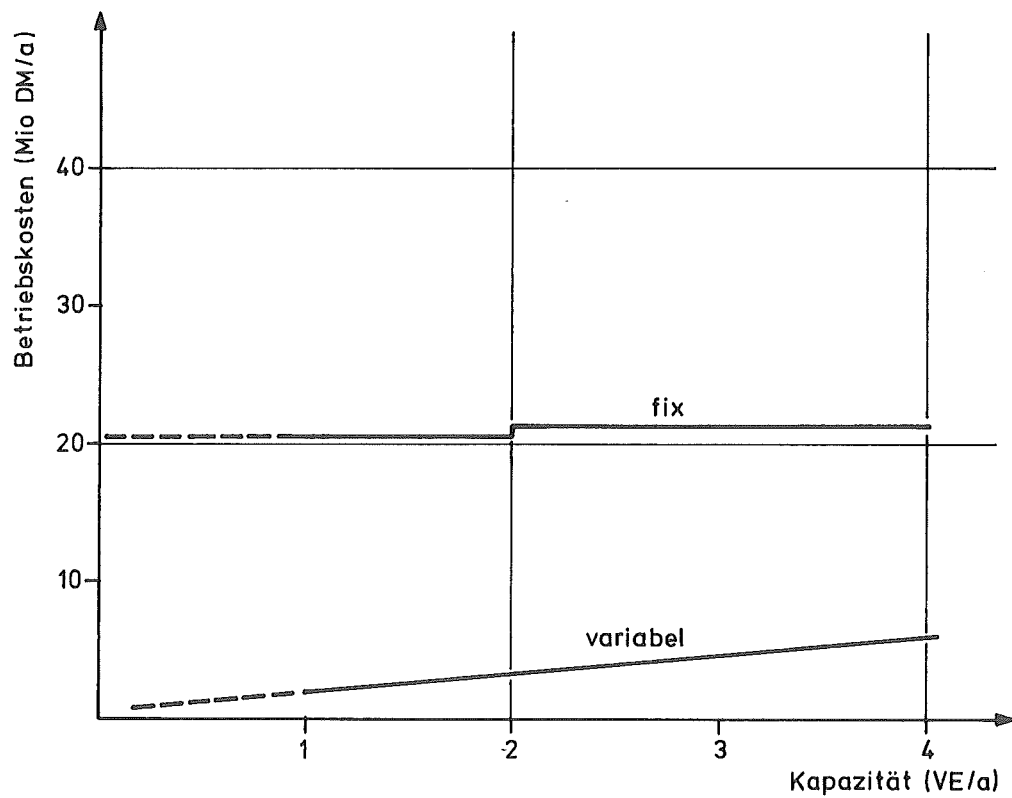
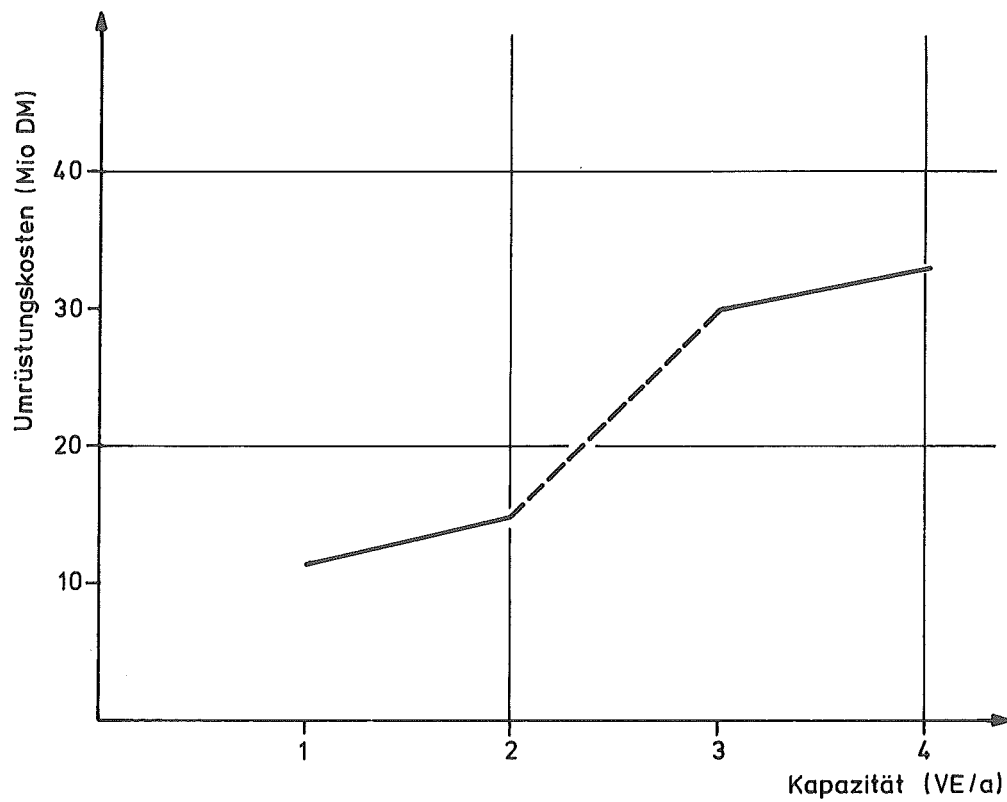


Abb. A 8

Kosten der WAK (ohne Head End)

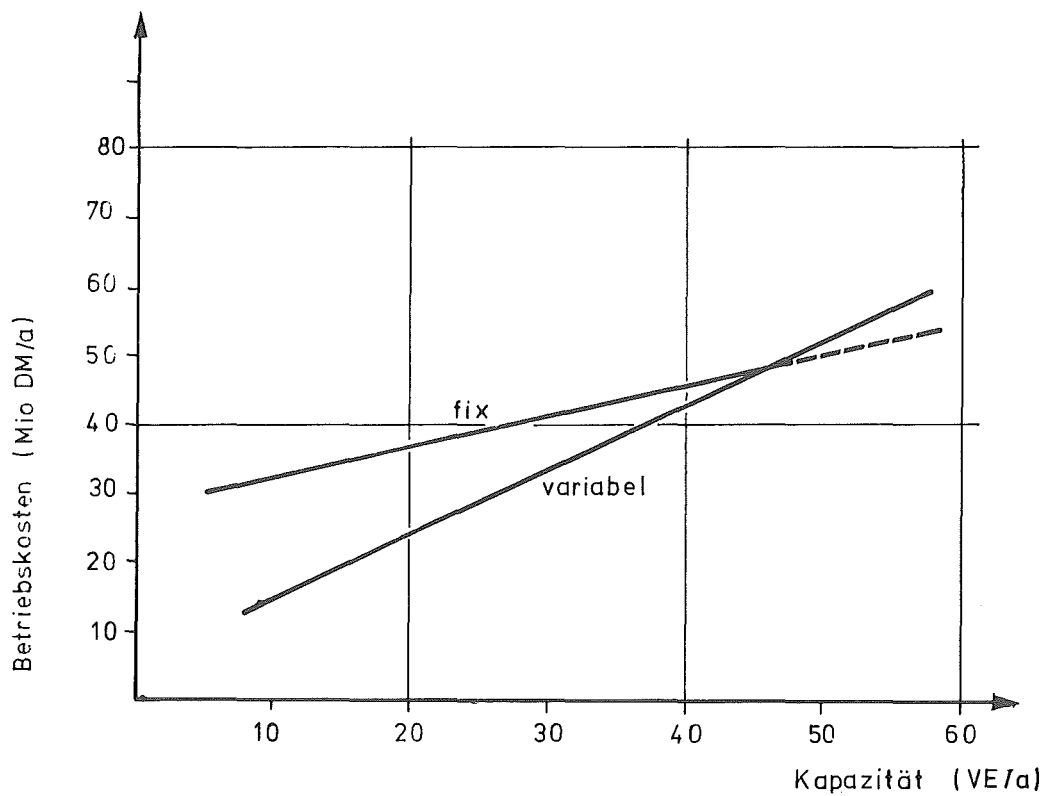
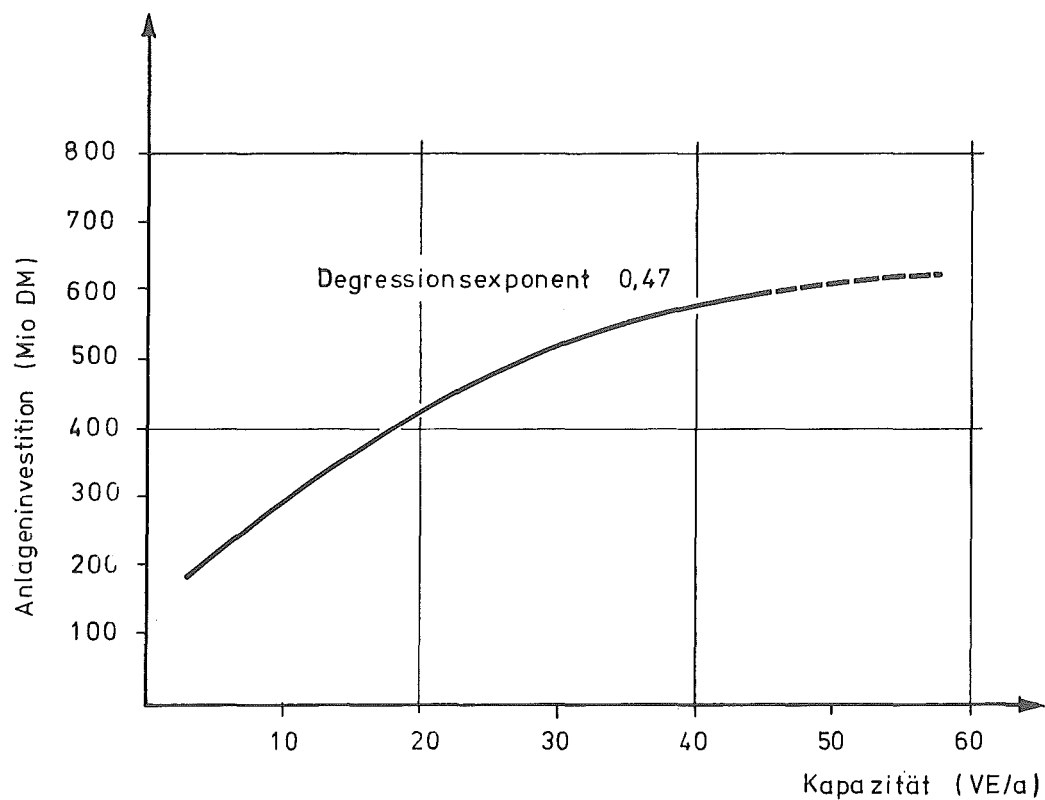


Abb. A9

Wiederaufarbeitungs- und Refabrikationskosten
(Refabrikation ohne ThO_2 -Partikeln und Graphit)

